

ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

**Локтионов Вадим Ильич**

**МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ АДАПТИВНОСТИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Научная специальность 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика  
(экономическая безопасность)

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
доктора экономических наук

Научный консультант  
доктор технических наук, доцент  
Суслов Константин Витальевич

Иркутск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	19
1.1. Эволюция концепции энергетической безопасности.....	19
1.2. Методические подходы к оценке энергетической безопасности.....	35
1.3. Актуальные направления развития методологии обеспечения энергетической безопасности России.....	65
ГЛАВА 2. СВОЙСТВО АДАПТИВНОСТИ КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ.....	78
2.1. Свойство адаптивности энергетических систем.....	78
2.2. Роль адаптивности энергетических систем в обеспечении энергетической безопасности.....	95
2.3. Факторы, определяющие уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях.....	107
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА УРОВНЯ АДАПТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	124
3.1. Принципы и критерии оценки адаптивности энергетических систем в современных условиях.....	124
3.2. Оценка уровня адаптивности альтернативных вариантов долгосрочного развития энергетических систем.....	136
3.3. Управление адаптивностью энергетических систем в целях обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны.....	158
ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ АДАПТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: РОЛЬ ИНВЕСТИЦИЙ.....	177
4.1. Инвестиции как фактор повышения уровня адаптивности энергетических систем.....	177
4.2. Свойство адаптивности инвестиционных проектов в ТЭК.....	193
4.3. Макроэкономические последствия реализации угрозы долгосрочного дефицита инвестиций в электроэнергетику .....	208

ГЛАВА 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ.....	218
5.1. Влияние угроз энергетической безопасности на качество жизни населения.....	218
5.2. Снижение влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения за счет развития устойчивой энергетики.....	231
5.3. Институциональные способы решения проблем становления устойчивой энергетики в России .....	245
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	271
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	278
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	313

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Несмотря на то, что Россия обладает огромными запасами энергетических ресурсов, проблема обеспечения энергетической безопасности остается актуальной, что обуславливается, с одной стороны, новыми вызовами и угрозами, стоящими перед Россией, а с другой – происходящими изменениями условий функционирования национальных энергетических компаний. Фундаментальные процессы в мировой энергетике и экономике (включающие становление «зеленой экономики» и развитие устойчивой энергетики, международную экономическую интеграцию, усиление геополитической напряженности, цифровизацию экономики и энергетики, развитие возобновляемых источников энергии, рост экологических требований и развитие новых технологий) в сочетании с ростом неопределенности и рисков функционирования отечественной экономики и энергетики, а также моральным и физическим устареванием основных производственных фондов в российском ТЭК обуславливают необходимость дальнейшего развития методологии решения стратегических задач обеспечения долгосрочной энергетической безопасности России.

В современных быстро меняющихся условиях основным свойством сложных систем, обеспечивающим их устойчивое и динамичное развитие, становится адаптивность. Адаптивность определяется как способность «подстраивания» системы к изменяющимся внешним и внутренним условиям для достижения первоначально поставленной цели. Любая система (экономическая, социальная и производственная) тем более жизнеспособна и эффективна с точки зрения достижения поставленных целей, чем более она адаптивна. В целях обеспечения долгосрочной энергетической безопасности данный факт оправдывает смещение в процессе управления энергетическими системами акцентов с текущего технического состояния систем, физической надежности производства и транспортировки энергетических ресурсов на построение адаптивных и устойчивых энергетических систем.

Обеспечение энергетической безопасности за счет увеличения адаптивности энергетических систем к внутренним и внешним изменениям обуславливает необходимость развития методов оценки адаптивных свойств энергетических систем, выявления факторов роста адаптивных свойств сложных систем, расширения теории управления адаптивностью и т.д., что определило тему и основные направления диссертационного исследования.

**Степень научной разработанности проблемы.** Проблема обеспечения энергетической безопасности привлекла внимание исследователей во время энергетических кризисов 1970-х и 1980-х гг., когда Европа столкнулась с нехваткой поставляемой нефти в сочетании с резким ростом цен на нее. В последнее десятилетие в связи с ростом геополитической напряженности, высокой волатильностью цен на нефть, борьбой с изменением климата и рядом других причин наблюдается возобновление интереса мирового научного сообщества к данной проблеме.

Многоаспектность проблемы обеспечения энергетической безопасности обуславливает наличие большого количества показателей, индексов и способов оценки ее уровня, которые характеризуют технические, социально-экономические, финансовые, экологические и др. аспекты функционирования национальных энергетических систем. Работы Б. Совакула, Д. Джевела, Л. Хьюза, П. Цвайфела, Д. Ергина, Ч. Винзера, А. Черпа, Л. Молиньякса и др. оказали значительное влияние на развитие методологического инструментария обеспечения энергетической безопасности и легли в основу специальных методов оценки и сравнения уровней энергетической безопасности стран и регионов, применяемых такими международными организациями, как Мировой энергетический совет (WEC), Всемирный экономический форум (WEF), Международное энергетическое агентство (IEA), Глобальный энергетический институт (GEI).

В России одними из первых вопросами обеспечения энергетической безопасности стали заниматься ученые Института народнохозяйственного прогнозирования РАН, Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО

РАН, Института энергетических исследований РАН и др. В. В. Бушуев, Ф. В. Веселов, С. А. Воронина, А. А. Макаров, А. М. Мастепанов, Т. А. Митрова, А. С. Некрасов, Б. Н. Порфирьев, Н. И. Пяткова, В. И. Рабчук, В. В. Семикашев, С. М. Сендеров, Ю. В. Синяк, Н. И. Суслов, О. В. Кондраков и др. внесли существенный вклад в теоретико-методологическое обеспечение энергетической безопасности страны и регионов.

Россия обладает большими запасами энергоресурсов и значительным производственным потенциалом ТЭК, позволяющим добывать первичные энергоресурсы не только для внутреннего потребления, но и на экспорт. По всем основным показателям энергетической безопасности, принятым в мировой практике, Россия имеет высокий уровень энергетической безопасности. В то же время исследования Ф. В. Веселова, А. А. Макарова, А. С. Некрасова, Б. Н. Порфирьева, В. В. Семикашева, С. М. Сендерова, Н. И. Сусллова, Н. Е. Терентьева показывают, что отечественный топливно-энергетический комплекс имеет ряд особенностей и проблем (большая неравномерно населенная территория; устаревание основных производственных фондов; технологическое отставание отраслей ТЭК России от мировых конкурентов и др.), которые, снижая способность российской энергетической системы сопротивляться разного рода стрессовым ситуациям, создают угрозы долгосрочной энергетической безопасности страны.

Прогнозные исследования Ю. Д. Кононова, А. Г. Коржубаева, И. В. Филимоновой, Л. В. Эдера, Б. Г. Санеева, А. Э. Конторовича и др. позволили выявить современные вызовы, стоящие перед национальной энергетикой, и определить приоритетные направления обеспечения энергетической безопасности.

Большая работа по развитию теории оценки энергетической безопасности страны и регионов России проведена в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН такими учеными, как С. М. Сендеров, Л. В. Массель, В. И. Рабчук, Н. И. Пяткова, Н. И. Воропай и др. Основным результатом проведенных исследований стала разработка метода индикативного анализа

уровня энергетической безопасности регионов. Несмотря на высокую значимость разработанного метода, оценка энергетической безопасности страны осуществляется преимущественно в контексте анализа рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в энергоснабжении регионов, повышения инвестиционной привлекательности электроэнергетики, обеспечения надежности и эффективности функционирования энергетических систем, не учитывая при этом влияние реализации стратегических угроз энергетической безопасности на экономическое благосостояние и качество жизни населения и упуская из вида проблемы развития финансово-экономических механизмов обеспечения долгосрочной энергетической безопасности. Для исследования влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения были использованы работы Дж. Ламберта, Л. Ли, К. Пастена, М. С. Элама, Дж. Форестера, В. Смита, А. Майерса и И. Смита, в которых был осуществлен анализ связи между качеством жизни населения, уровнем энергопотребления и уровнем национальной энергетической безопасности. Анализ проблем повышения уровня энергетической безопасности страны в контексте обеспечения национальной и экономической безопасности проводился на основе работ М. И. Кротова и В. К. Сенчагова.

В условиях усиления геополитической напряженности особое значение приобретает анализ взаимовлияния геополитики и энергетики с позиций национальной и глобальной энергетической безопасности, осуществленный в работах А. А. Макарова, Т. А. Митровой, В. В. Костюка, А. М. Мастепанова, В. В. Бушуева, Н. И. Воропая, В. В. Семикашева, А. Ю. Колпакова, А. А. Широга и др.

Изучение свойства адаптивности энергетических систем было проведено на основе результатов исследований как отечественных, так и зарубежных ученых. Среди зарубежных исследований можно выделить работы таких авторов, как Л. Хьюз, Э. Сиошанси, Л. Молиньякс, У. Лин, Ю. Ю. Хаймс, Б. Волкер, С. Виг и др., посвященные проблемам адаптивности энергетических систем. Среди отечественных исследователей значительные научные и

практические результаты в области анализа адаптивности и устойчивости энергетических и экономических систем были получены А. А. Макаровым, Л. А. Миэринь, В. А. Смирновым, А. И. Карповичем и др.

При анализе адаптационных свойств инвестиционных проектов в ТЭК были использованы работы П. Л. Виленского, В. Н. Лившица, Д. С. Львова, С. А. Смоляка и др.

На основе анализа современного состояния исследований в области обеспечения энергетической безопасности и текущих тенденций в энергетике и экономике была предложена **рабочая гипотеза исследования**: в условиях необходимости обеспечения форсированного экономического развития страны, а также перехода Российской Федерации к новой модели социально-экономического развития, предполагающей структурную трансформацию экономики и сбалансированное пространственное и региональное развитие, обеспечение долгосрочной энергетической безопасности может быть осуществлено за счет развития адаптивных свойств энергетических систем разного уровня.

Необходимость повышения обоснованности и эффективности стратегических решений в ТЭК и обеспечения энергетической безопасности страны путем разработки и внедрения в практику методов оценки и способов увеличения адаптивности энергетических систем обуславливает актуальность заявленной темы исследования и определяет постановку его цели и задач.

**Цель и задачи диссертационного исследования.** Цель исследования – теоретико-методологическая разработка инструментов управления адаптивностью энергетических систем разного уровня организации к изменяющимся условиям их функционирования для обеспечения энергетической безопасности страны и регионов.

Для достижения заявленной цели были поставлены и решены следующие задачи исследования:

- провести анализ теоретических оснований концепции энергетической безопасности, включающий выявление предпосылок возникновения концепции,



изучение этапов и факторов ее эволюции, анализ современного содержания понятия «энергетическая безопасность»;

- определить актуальные направления развития методологии обеспечения энергетической безопасности на основе анализа существующих методических подходов к оценке энергетической безопасности страны и регионов, текущих тенденций развития экономики и энергетики, а также официальных взглядов на обеспечение энергетической безопасности страны, отраженных в Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации;

- обосновать необходимость разработки способов и инструментов управления адаптивностью энергетических систем в целях обеспечения энергетической безопасности страны и регионов;

- выявить факторы, определяющие уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях, проанализировать принципы и критерии оценки адаптивности энергетических систем;

- разработать метод оценки уровня адаптивности и эффективности альтернативных вариантов долгосрочного развития энергетических систем;

- разработать способы и инструменты управления адаптивностью энергетических систем в целях обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны и регионов;

- обосновать значимость инвестиций в процессе повышения уровня адаптивности энергетических систем, а также раскрыть механизм влияния дефицита инвестиционных вложений на энергетическую безопасность страны и регионов;

- проанализировать свойство адаптивности инвестиционных проектов в энергетике в контексте влияния реализации отдельных крупномасштабных проектов капиталовложений на адаптивные свойства энергетических систем;

- проанализировать механизм влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения, а также обосновать возможность

снижения этого влияния за счет развития «зеленой экономики» и устойчивой энергетики.

**Область исследования.** Диссертационное исследование выполнено по специальности 5.2.3 «Региональная и отраслевая экономика» и соответствует направлению 13. «Экономическая безопасность», п. 13.6. «Проблемы и механизмы обеспечения энергетической безопасности».

**Объектом исследования являются** энергетические системы разного уровня организации.

**Предметом исследования** выступает свойство адаптивности энергетических систем как инструмент обеспечения энергетической безопасности страны.

**Теоретической основой исследования** являются научные труды зарубежных и отечественных ученых, посвященные проблемам обеспечения энергетической безопасности, оценки уровня адаптивности сложных систем, проблемам прогнозирования развития ТЭК страны, вопросам формирования государственной энергетической политики, методам инвестиционного анализа в ТЭК, методам выявления и управления рисками функционирования компаний энергетического сектора и др.

**Методологической основой исследования** являются общенаучные и специальные методы исследования: методы системного анализа, методы экономико-статистического анализа (статистическое наблюдение, корреляционный и регрессионный анализ, анализ рядов динамики), методы экономико-математического моделирования, метод экспертных оценок, количественные методы финансово-инвестиционного анализа и др. Обработка статистических данных осуществлялась с использованием таких прикладных программных продуктов, как Microsoft Excel и Microsoft Visio. Отдельные расчеты, иллюстрирующие взаимосвязи экономики и энергетики, осуществлялись на основе разработанной в ИСЭМ СО РАН межотраслевой оптимизационной модели МИДЛ.

**Информационную базу исследования** составили законодательные и нормативные акты Российской Федерации, официальные данные Федеральной службы государственной статистики, представленные в сборниках «Российский статистический ежегодник», «Регионы России», «Промышленность России». В работе использовались данные, опубликованные в отечественных и зарубежных научных изданиях, периодической печати, материалы научно-практических конференций и семинаров, а также данные, полученные автором самостоятельно в результате анализа имеющейся статистической информации.

Кроме того, принимались во внимание данные аналитических отчетов и программных документов Правительства РФ, Министерства природных ресурсов и экологии РФ, Министерства энергетики РФ, Министерства экономического развития РФ, а также статистические сборники Международного энергетического агентства (IEA), ВР, Международного энергетического форума (МЭФ) и др.

**Научная новизна** основных положений диссертационного исследования, выносимых на защиту, состоит в разработке методологических подходов к управлению адаптивными свойствами энергетических систем разного уровня организации в условиях возрастания рисков реализации угроз энергетической безопасности страны и необходимости повышения качества жизни населения.

**Наиболее существенные результаты диссертационного исследования, полученные автором:**

- на основе выявленных факторов эволюции концепции энергетической безопасности предложен авторский подход к ее периодизации, что позволило уточнить содержание понятия «энергетическая безопасность»;
- обоснована разница в подходах к оценке и в способах обеспечения энергетической безопасности между странами нетто-импортерами и нетто-экспортерами энергетических ресурсов;
- обоснована необходимость интеграции в алгоритм обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны таких элементов, как анализ уровня адаптивности энергетических систем, анализ инвестиционной

привлекательности экономики и энергетики, а также анализ влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения;

- выявлена совокупность факторов, определяющих уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях;

- сформулированы принципы добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему при разработке энергетической политики, направленной на увеличение адаптивности национальной энергетической системы. Выделены и описаны методы и способы прямого и косвенного управляющего воздействия на национальную энергетическую систему, позволяющие повышать уровень ее адаптивности;

- разработан метод оценки уровня адаптивности и эффективности вариантов долгосрочного развития энергетических систем с целью повышения обоснованности принимаемых стратегических решений в энергетике;

- раскрыт механизм положительного влияния инвестиций на адаптивные свойства энергетических систем;

- раскрыт механизм долгосрочного самоусиливающегося процесса развертывания стратегической угрозы дефицита инвестиций в энергетике, сопровождающегося падением адаптивных свойств энергетических систем.

Проанализированы макроэкономические последствия дефицита инвестиций;

- раскрыто и формально описано свойство адаптивности инвестиционных проектов в энергетике в контексте влияния реализации отдельных крупномасштабных проектов капиталовложений на адаптивные свойства энергетических систем. Предложен метод оценки эффективности инвестиционных проектов в ТЭК с учетом предельных цен на энергоносители;

- выявлены механизмы влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения. Предложен метод оценки рисков снижения качества жизни населения в результате реализации стратегических угроз энергетической безопасности;

– обоснована возможность снижения влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения за счет развития устойчивой энергетики, способствующей повышению адаптивных свойств энергетических систем разного уровня организации.

**Обоснованность и достоверность научных положений,** выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертационном исследовании, обеспечена корректностью применения совокупности научных методов и подходов; использованием официальных статистических материалов российских и международных организаций; изучением теоретических и практических результатов исследований отечественных и зарубежных ученых, опубликованных в научных журналах, отчетах и монографиях; представлением полученных результатов на международных и всероссийских конференциях. Актуальность исследования, обоснованность используемых методов и подходов к решаемым задачам, а также достоверность и значимость полученных результатов были подтверждены экспертами РФФИ и РНФ, проводившими экспертизу итогов выполнения проектов №17-06-00102-а и №19-78-00007, которыми руководил автор исследования, и в процессе выполнения которых были получены основные результаты, представленные в диссертационной работе.

**Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования.** По мнению академика Л. А. Мелентьева, системные исследования в энергетике должны развиваться в двух направлениях: теоретическом, включающем анализ основных свойств систем энергетики и создание методов и способов их изучения, и прикладном, направленном на создание методов оптимального управления в энергетике, решение комплексных межотраслевых проблем энергетики и т. д. Результаты, полученные в рамках проведенного исследования, имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Теоретическая значимость полученных результатов обеспечивается приращением научного знания в области функционирования систем энергетики посредством установления общих

закономерностей их развития в условиях возрастания рисков реализации угроз энергетической безопасности страны и необходимости повышения качества жизни населения. Практическая значимость результатов диссертационного исследования обуславливается развитием существующих методов принятия оптимальных решений в ТЭК в целях решения задач обеспечения энергетической безопасности страны и совершенствования государственного управления в данной области.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы в качестве:

- методических рекомендаций для подготовки аналитических материалов при принятии стратегических решений в ТЭК, а также при разработке и реализации государственной политики в области энергетики в части создания системы управления рисками в области энергетической безопасности, оптимизации финансовой нагрузки на организации топливно-энергетического комплекса и привлечения в них инвестиций;
- учебно-методических разработок по вопросам функционирования современных энергетических систем и обеспечения энергетической безопасности страны.

**Апробация результатов исследования.** Результаты проведенного исследования обсуждались на международных и всероссийских конференциях, форумах и симпозиумах: международная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2020» (г. Владивосток, 6-9 октября 2020 г.); VII международная научно-практическая конференция «Устойчивое развитие: Общество и экономика» в рамках IV международного экономического симпозиума (г. Санкт-Петербург, 25-27 июня 2020 г.); международная конференция «Theoretical and practical aspects of public finance», (Чехия, г. Прага, 12-13 апреля 2019); международная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2018» (г. Владивосток, 2-4 октября 2018 г.); международный семинар «Критические инфраструктуры: ситуационное управление, интеллектуальные, агентные,

облачные вычисления и кибербезопасность» (г. Иркутск, 17-24 марта 2018 г.); XIV международная научно-практическая конференция «Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики» (г. Екатеринбург, 15-16 декабря 2016 г.); международная научно-практическая конференция «Актуальные тенденции развития мировой экономики» (г. Иркутск, 15-16 марта 2016 г.); XIII международная научно-практическая конференция «Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики» (г. Екатеринбург, 29-30 октября 2015 г.); VII всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (г. Благовещенск, июнь 2013 г.); международная конференция «Энергетика России в XXI веке: стратегия развития – восточный вектор» (г. Иркутск, 1-3 сентября 2010 г.); международная конференция «Стратегические направления устойчивого развития Байкальского региона» (г. Иркутск, 2010 г.); IX всероссийская конференция «Актуальные вопросы экономики и социологии» (г. Новосибирск, 21-23 октября 2013 г.); VIII всероссийская осенняя конференция «Актуальные вопросы экономики и социологии» (г. Новосибирск, 19-21 ноября 2012 г.).

Исследования, лежащие в основе диссертационной работы, поддержаны грантами РФФИ и РНФ. Под руководством соискателя были реализованы следующие проекты:

– «Методы оценки и способы повышения адаптивности энергетических систем в целях увеличения эффективности стратегических решений развития ТЭК и роста энергетической безопасности страны» (поддержан грантом РФФИ № 17-06-00102-а, 2017-2019 гг., номер государственной регистрации в ФГАНУ ЦИТиС АААА-А17-117040710126-2);

– «Методы и макроэкономические показатели оценки рисков стратегических угроз энергетической безопасности в контексте повышения качества жизни населения» (поддержан грантом РНФ №19-78-00007, 2019-2021

гг., номер государственной регистрации в ФГАНУ ЦИТиС АААА-А19-119072290023-4).

Отдельные научные результаты получены соискателем при участии в реализации следующих проектов, поддержанных грантами РФФИ: «Разработка методического инструментария и исследование влияния характера неопределенности будущих условий на эффективность и реализуемость вариантов развития и модернизации систем энергетики» (№12-06-00090-а); «Моделирование и долгосрочное прогнозирование цен и спроса на региональных энергетических рынках в условиях усложнения взаимосвязей энергетики и экономики и роста неопределенности» (№13-06-00303-а); «Моделирование и долгосрочное прогнозирование рыночного спроса на энергоносители в условиях роста отраслевой неоднородности и территориальной неравномерности развития экономики» (№16-06-00230-а); «Влияние рассматриваемой перспективы и роста неопределенности на выбор приемлемых методов решения задач долгосрочного прогнозирования» (№16-06-00091-а); «Методы оценки и учета новых тенденций и роста неопределенности во взаимосвязях энергетики и экономики для повышения обоснованности стратегических решений» (№18-010-00176-а); «Методология и методы количественной оценки долгосрочного влияния на конъюнктуру региональных энергетических рынков цифровизации экономики и энергетики и увеличения роли активных потребителей и распределенной генерации» (№20-010-00204-а).

Научные результаты диссертационного исследования, полученные при выполнении проектов, поддержанных грантами РФФИ и РФФИ, получили положительную оценку экспертов фондов.

**Публикации по теме исследования.** Результаты научного исследования отражены в 24 статьях и 1 монографии общим объемом 25,95 п. л. (в т. ч. автора 22,65 п. л.), в том числе в 17 статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной



комиссией Минобрнауки РФ, и 8 статьях, опубликованных в журналах, входящих в международные базы цитирования SCOPUS и WOS.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 318 страницах и включает 38 таблицы, 68 рисунков. Библиографический список включает 363 наименования.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, степень научной разработанности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, показана теоретическая и практическая значимость работы, определены предмет, объект и методологическая основа исследования, показана теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования, выделены основные элементы научной новизны и наиболее существенные результаты, полученные автором.

В первой главе «Методологические подходы к определению и оценке энергетической безопасности» рассмотрена эволюция концепции энергетической безопасности и выявлены основные факторы и события, определившие данную эволюцию, проведен анализ существующих методических подходов к оценке энергетической безопасности, а также определены актуальные направления развития методологии обеспечения энергетической безопасности России.

Во второй главе «Свойство адаптивности как фактор обеспечения энергетической безопасности страны» проведено исследование роли адаптивности в процессе обеспечения энергетической безопасности и выявлены факторы, определяющие уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях.

В третьей главе «Оценка уровня адаптивности энергетических систем» проанализированы принципы и критерии оценки адаптивности энергетических систем, что позволило разработать метод оценки уровня адаптивности и эффективности альтернативных вариантов долгосрочного развития энергетической системы. Сформулированные принципы добавления новых

элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему при разработке энергетической политики, направленной на увеличение адаптивности системы, а также выделенные и описанные методы прямого и косвенного управляющего воздействия на энергетическую систему, повышающие уровень ее адаптивности, позволили развить теорию управления адаптивностью энергетических систем в целях обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны.

В четвертой главе «Повышение уровня адаптивности энергетических систем: роль инвестиций» проанализирована роль инвестиций в энергетику в процессе формирования адаптивных свойств энергетических систем, описано свойство адаптивности инвестиционных проектов в ТЭК в контексте влияния реализации отдельных крупномасштабных проектов капиталовложений на адаптивные свойства энергетических систем, раскрыт механизм влияния дефицита инвестиционных вложений на энергетическую безопасность страны и проанализированы макроэкономические последствия дефицита инвестиций.

В пятой главе «Энергетическая безопасность как фактор повышения качества жизни населения» проанализировано влияние угроз энергетической безопасности на качество жизни населения, обоснована возможность снижения этого влияния за счет развития устойчивой энергетики, а также предложены институциональные способы решения проблем становления устойчивой энергетики в России.

В заключении подведены итоги проведенного исследования, сделаны выводы и сформулированы наиболее значимые результаты диссертационного исследования.

## ГЛАВА 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И ОЦЕНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### 1.1. Эволюция концепции энергетической безопасности

Ввиду того, что энергия является ключевым фактором, обеспечивающим функционирование современного общества, концепция энергетической безопасности, а также методы ее оценки и способы ее повышения являются предметом активных дискуссий и интенсивных исследований. Несмотря на кажущуюся простоту и очевидность понятия энергетической безопасности, с течением времени содержание концепции энергетической безопасности претерпело значительные изменения.

Потребление энергетических ресурсов всегда сопровождало существование любого общества, однако только с началом промышленной революции роль энергии стала ключевой в обеспечении устойчивого социально-экономического развития. В результате промышленной революции, начавшейся в Англии в середине 1700-х годов, уголь начал заменять биомассу в качестве основного источника энергии. Между 1650 и 1740 годами реальные цены на древесину значительно возросли, что способствовало ее постепенному замещению углем [238]. В течение XVIII века многие отрасли промышленности полностью заменили древесину углем, а к началу XIX века от органической биомассы к ископаемым видам топлива перешли службы отопления. В этот период впервые пришло понимание того, что контроль над источниками ископаемых видов топлива является решающим фактором успешного ведения войн и устойчивости систем производства, транспорта и связи.

Резкий рост потребления угля в XIX веке вызвал озабоченность по поводу возможных последствий его дефицита для производственного процесса [269]. У. С. Джевонс, известный британский экономист, ставший также одним из основоположников теории предельной полезности, своей работой «The coal question», в которой рассматриваются фундаментальные вопросы энергетической эффективности и использования энергетических ресурсов, внес

значительный вклад в становление экономики энергетики. У. С. Джевонс утверждал, что поскольку рост промышленности в Великобритании основывался на дешевом угле, его растущая стоимость, связанная с необходимостью разработки все более глубоких залежей угля, угрожает экономическом застою. Пессимистический взгляд У. С. Джевонса на энергетическую обеспеченность экономики Великобритании выражался в том, что, по его мнению, ни развитие технологий, ни использование других энергетических ресурсов не устранил данную угрозу экономического развития страны. У. С. Джевонс раскрыл эффект, согласно которому повышение эффективности использования природных ресурсов, таких как уголь, порождает только повышенный спрос на этот ресурс, а не снижение спроса на него, как можно было бы ожидать («Парадокс Джевонса»). Несмотря на то, что У. С. Джевонс не рассматривал экологические и социальные проблемы истощения запасов угля в Великобритании и в мире, недооценивал роль нефти и гидроэнергетики как альтернативы угля, его работа внесла значительный вклад в развитие теории экономики энергетики и экологии, а также послужила началом изучения вопросов обеспечения энергетической безопасности страны.

В первой половине XX века интерес к обеспечению энергетической безопасности проявлялся в большей степени в отношении обеспечения топливом и энергией армий для сохранения их боеспособности. Д. Ергин описывает, как случившийся кризис топливоснабжения в Великобритании в конце 1916 г. вынудил правительство страны ввести политику топливного нормирования, стимулировал разработку согласованной национальной нефтяной политики и пробудил интерес к вопросам энергетической безопасности [360, стр. 176].

Наряду с Великобританией с проблемами поставок топлива к концу Первой мировой войны столкнулись и другие страны. В результате в феврале 1918 г. была проведена международная конференция, в которой принимали участие США, Великобритания, Франция и Италия, с целью координации и контроля всех поставок нефти среди стран-союзниц. Выработанная

логистическая система вместе с введением усиленной охраны нефтяных танкеров решила проблему поставок нефти до конца Первой мировой войны. Накануне Второй мировой войны этот вопрос снова стал актуальным, и в 1937 г., осознав стратегическую роль нефти, правительство Великобритании в целях военного планирования инициировало работу по анализу надежности поставок нефти в страну [360, стр. 366].

В начале Второй мировой войны проблема обеспечения топливом национальных экономик и армий стала еще более острой, что объясняется резким ростом количества транспорта, самолетов, подводных лодок, задействованных в боевых действиях, а также ростом энергоемкого промышленного производства. Благодаря массовой механизации мировой спрос на нефть с конца Первой мировой войны до начала Второй мировой войны вырос более чем в 3 раза.

Германия, в 1930-х годах сильно зависевшая от импорта нефти, но в то же время обладающая большими запасами угля, готовясь к войне, для обеспечения своей энергетической безопасности стала активно производить синтетическое топливо. К началу Второй мировой войны синтетическое топливо на основе угля удовлетворяло почти половину потребностей страны в нефти [206]. Однако поскольку инфраструктура, необходимая для производства синтетического топлива, была сложной, дорогостоящей и уязвимой для воздушных атак, производство синтетического топлива незначительно увеличило степень энергетической безопасности Германии.

Во время Суэцкого кризиса в 1956 г. стала очевидной зависимость экономик Великобритании и Западной Европы от стабильности поставок нефти с Ближнего Востока [209]. Именно в этот период, когда решение проблемы обеспечения экономики энергетическими ресурсами становится одной из наиболее актуальных экономических и политических задач, возникает концепция энергетической безопасности.

Начало академического развития концепции энергетической безопасности пришлось на 1960-е гг. Одной из первых работ, напрямую посвященных

проблеме обеспечения энергетической безопасности, была статья Г. Лубела [297] «Надежность поставок и энергетическая политика Западной Европы», в которой автор рассматривает тенденцию к увеличению рисков перебоя поставок нефти в Западную Европу в связи с быстрым ростом как количества потребляемой нефти, так и ее доли в энергетическом балансе. Г. Лубел отмечал, что риск перебоя поставок нефти для стран Западной Европы значительно выше, чем для США и СССР, которые имели свои большие запасы данного углеводорода. Резкий рост потребления нефти в странах Западной Европы начался за несколько лет до опубликования упоминаемой статьи.

Следующим толчком, послужившим дальнейшему развитию концепции энергетической безопасности, стал нефтяной кризис 1973-1974 гг., когда страны-члены ОПЕК ввели эмбарго на поставку нефти в страны, поддержавшие Израиль в войне с Сирией и Египтом. В результате цены на нефть выросли за год почти в четыре раза. Кроме того, в период с 1976 г. до середины 1980-х гг. произошла национализация нефтяных отраслей в большинстве нефтедобывающих стран Ближнего Востока, что сопровождалось быстрым ростом цен на нефть и последующим экономическим спадом.

Эти события вызвали серьезные опасения в отношении надежности поставок нефти. Научные исследования 1970-х–1990-х гг. в области обеспечения энергоресурсами экономик стран в большей степени затрагивали проблемы функционирования и эффективности мировых энергетических рынков. В целом можно отметить характерное для данного периода единство смыслового содержания понятия энергетической безопасности как надежности и бесперебойности поставок нефти в сочетании со стабильностью цен. Так в [225] указывается, что суть проблемы обеспечения энергетической безопасности США и других стран Западной Европы заключается в уязвимости поставок нефти, а также в возможном резком повышении цен на нее вследствие этих перебоев.

В книге «Экономика энергетической безопасности» [218], объединившей результаты исследований за предшествующие 20 лет, посвященных проблемам обеспечения энергетической безопасности, авторы дают следующее определение: энергетическая безопасность связана с возможными экономическими потерями в результате изменения цены энергетических ресурсов или их наличия. Несмотря на то, что давая определение энергетической безопасности, авторы говорят об энергетических ресурсах в целом, ключевая роль в их исследованиях отводится нефти. Подобной же точки зрения относительно трактовки понятия энергетической безопасности придерживались Д. А. Диз [229], Т. Берглунд и Л. Моден [213]. По их мнению, энергетическая безопасность страны определяется ее возможностью бесперебойного получения энергетических ресурсов по приемлемой цене.

В том же ключе в начале 1990-х гг. уровень энергетической безопасности США анализирует Дж. Георгиу [242]. Согласно его исследованию, учитывая структуру производства и потребления энергии в 1980-х гг., нефть рассматривалась как ключевой источник энергии в XXI в. как для США, так и для всего мира, а наибольшие риски для энергетической безопасности США связывались с кризисами международного рынка нефти. П. Цвейфел и С. Бонома [363] основными рисками национальной энергетической безопасности называют перебои в поставках нефти и газа в страну. Ученые проводят анализ возможных последствий реализации рисков перебоев в поставках энергетических ресурсов, с которыми сталкивается национальная экономика, а одним из наиболее эффективных способов снижения рисков энергетической безопасности они называют резервирование энергетических ресурсов. Международное энергетическое агентство (МЭА) на случай перебоя в поставках рекомендовало странам иметь запасы нефти и газа на 90 дней. Данный срок был своего рода компромиссом между обеспечением энергетической безопасности и затратами, обусловленными хранением резервов. Ученые обосновывали необходимость увеличения объемов

резервирования, так как проводившийся ранее МЭА анализ рисков перебоев в поставках нефти и газа не учитывал вероятности одновременного перебоя.

После стабилизации мировых цен на нефть и снижения вероятности введения нефтяных эмбарго активность ученых, занятых решением проблем обеспечения энергетической безопасности, заметно снизилась вплоть до конца 2000-х гг. Всплеск интереса в научных и политических кругах к проблеме оценки и обеспечения энергетической безопасности в конце 2000-х гг. был обусловлен рядом причин:

1. Рост политической нестабильности в мире, обусловленный такими событиями, как теракт в США в 2001 г., «цветные революции» в Югославии (2000 г.), Грузии (2003 г.), на Украине (2004 г.), ядерные испытания в КНДР (2006 г., 2009 г.), военное столкновение в Южной Осетии (2008 г.) и др.

2. Война в Ираке (2003 г.). Формальным поводом к вторжению послужила необходимость уничтожения оружия массового поражения и свержения режима Саддама Хусейна, который поддерживал связи с международным терроризмом. Данный военный конфликт привел к дестабилизации политической ситуации в регионе и обострил проблемы, связанные с обеспечением надежности поставок нефти с Ближнего Востока.

3. Участвовавшие случаи аварийных отключений электроэнергии и разрушений производственных объектов, вызванные чрезвычайными погодными условиями:

– 19 сентября 2003 г. ураган «Изабель» привел к нарушению электроснабжения в девяти штатах США.

– 28 сентября 2003 г. шторм вызвал падение дерева и повреждение ЛЭП, соединяющей Швейцарию и Италию. Произошедшее в результате отключение электроэнергии затронуло почти всю территорию Италии и часть Швейцарии.

– В конце августа 2005 г. ураган «Катрина» серьезно повредил нефтедобывающие и нефтеперерабатывающие заводы в Мексиканском заливе в США.



4. Разногласия по вопросам транспортировки газа между Россией и Украиной (2005–2006 гг.), вызвавшие беспокойство европейских стран по поводу надежности поставок газа из России. Данное обстоятельство привело к практическим изменениям в их энергетической политике.

5. Резкое повышение цен на нефть к 2008 г. Период относительной стабильности цен на нефть с середины 1980-х гг. по конец 1990-х гг. сменился периодом их резкого роста. С 1999 г. по 2008 г. цена на нефть выросла более чем в 6 раз. Последовавший затем двухгодичный период падения цен вновь сменился периодом роста, и уже в 2011 г. цена на нефть достигала 111 долл. за баррель марки Brent. Интерес к проблеме энергетической безопасности подогревался не только ростом цен на нефть, но и сильными их колебаниями в сочетании со сложностью прогнозирования дальнейшей динамики.

6. Быстрый рост спроса на энергоресурсы в странах Азии, что создало ситуацию перераспределения мировых потоков энергоресурсов. Доля Китая в мировом потреблении энергоресурсов за период с 1991 г. по 2008 г. выросла с 8,8% до 19%, при этом в абсолютном измерении потребление энергоресурсов Китаем возросло в 3 раза. Доля стран АТР в мировом потреблении энергоресурсов за тот же период возросла с 22,3% до 36,7%.

7. Мировой финансово-экономический кризис 2008 г., вызвавший резкий рост интереса к вопросам экономической и финансовой безопасности, которые стали рассматриваться среди прочего и в контексте обеспечения надежности поставок энергетических ресурсов.

8. Авария на АЭС «Фукусима-1» в Японии (2011 г.). Данная авария, первоначально вызванная природными катаклизмами (землетрясением и последовавшим за ним цунами), оказала влияние на международный газовый рынок, поскольку Япония и другие страны пересмотрели роль ядерной энергетики. В результате стихийного бедствия рост потребления природного газа в Японии составил 11,6% в 2011 г. и 10,8% в 2012 г. Японское правительство стремилось значительно снизить роль ядерной энергетики, в результате выработка электроэнергии на АЭС резко снижалась в течение

последующих 2 лет и составила 0 кВтч в мае 2012 г. Только с 2015 г. Япония стала производить электроэнергию на АЭС, хотя объемы вырабатываемой на АЭС электроэнергии не сопоставимы с доаварийными: 294,2 млрд кВтч в 2010 г. против 29,1 млрд кВтч в 2017 г. Вслед за Японией Германия значительно снизила объемы электроэнергии, производимой на АЭС (с 140,6 млрд кВтч в 2010 г. до 75,9 млрд кВтч в 2017 г.).

Как отмечает Л. Честер [222], несмотря на наличие исследований по проблемам обеспечения энергетической безопасности, концепция энергетической безопасности четко не артикулировалась, а понималась скорее интуитивно вплоть до 2005 г., когда стали появляться работы, направленные на ее теоретическое развитие [277, 358]. Кроме того, как показывает Д. А. Болдвин [208], в 1990-х гг. сама концепция национальной безопасности, в рамках которой определяется энергетическая безопасность, была размыта.

В 2018 г. В. Чжоу [361] с коллегами проанализировали количество (рис. 1.1) и содержание публикаций, посвященных тем или иным аспектам проблемы обеспечения энергетической безопасности и отраженных в международных базах цитирования. Большинство рассматриваемых публикаций имеют не теоретический, а прикладной характер, и затрагивают такие области, как [203]:

- обеспечение энергоэффективности экономики;
- развитие инфраструктуры энергетических систем;
- оценка социально-экономических последствий перебоев в поставках энергетических ресурсов;
- оценка влияния на энергетику и экономику страны или региона колебаний цен на энергетические ресурсы;
- разработка эффективной энергетической политики государства.

Статьи на тему энергетической безопасности, как правило, относятся к одной или нескольким из вышеперечисленных тематик и относительно редко затрагивают исключительно вопросы теоретического развития концепции энергетической безопасности.

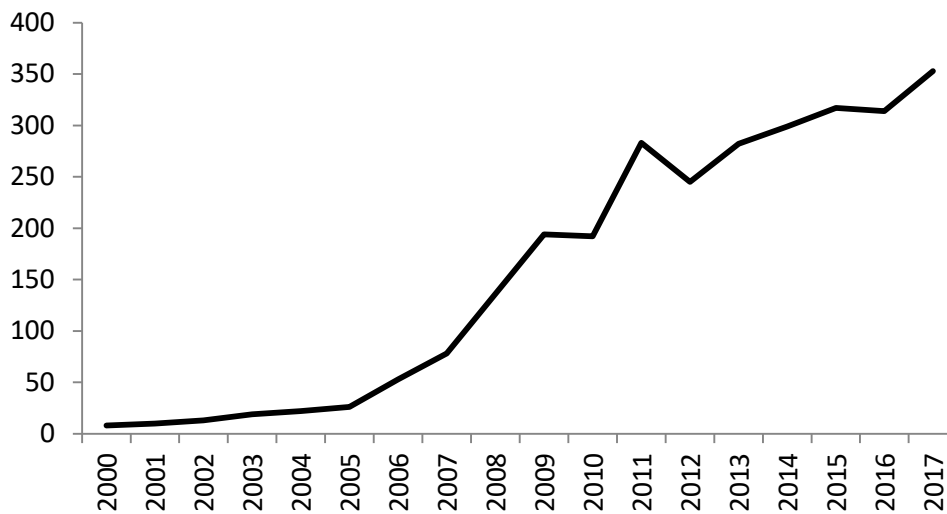


Рисунок 1.1 – Количество публикаций, посвященных проблемам энергетической безопасности, отраженных в базе данных Web of Science

Источник: [361]

Кроме вышеназванных причин развитие концепции энергетической безопасности стимулировал произошедший сдвиг в парадигме социально-экономического развития, начавшийся в 2000-х гг. [246, 338, 339, 340]. Концепция энергетической безопасности стала охватывать такие сферы, как экологическая безопасность, энергетическая бедность и устойчивость экономического развития. Активное расширение концепции энергетической безопасности и включение в нее новых аспектов функционирования энергетики и экономики прослеживается с 2005 г. – после вступления в силу Киотского протокола, обязавшего развитые страны и страны с переходной экономикой ограничивать и сокращать выбросы парниковых газов в соответствии с индивидуальными целевыми показателями. Если ранее ключевыми являлись только два аспекта энергетической безопасности - наличие энергетических ресурсов и их стоимость, то теперь их перечень пополнился экологической приемлемостью и надежностью поставок. Данные аспекты концепции энергетической безопасности стали называться «4А» («the four As of energy security»), по первым буквам названий ключевых составляющих):

- availability – физическое наличие запасов энергетических ресурсов;
- affordability – экономическая приемлемость цены энергоносителя;
- accessibility – физическая доступность энергоресурсов;
- acceptability – экологическая приемлемость использования энергоносителя.

Впервые данный подход к содержанию концепции энергетической безопасности был описан в докладе, посвященном проблеме обеспечения энергетической безопасности в Азии, подготовленном APERC (Asia Pacific Energy Research Centre) в 2007 г. [206]. В дальнейшем в рамках подхода «4А» были выполнены исследования [277], в которых был предложен ряд индикаторов энергетической безопасности, а также проанализирована связь четырех аспектов энергетической безопасности с четырьмя мировыми тенденциями в развитии экономики и энергетики: глобализацией, регионализацией, экологичностью и экономической эффективностью (рис. 1.2).

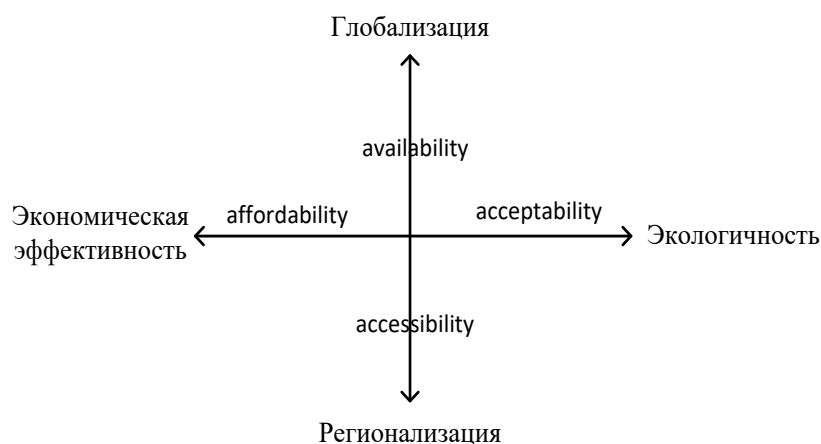


Рисунок 1.2 – Четыре аспекта энергетической безопасности и их связь с глобальными тенденциями развития экономики и энергетики

Источник: [277]

Как видно из рис. 1.2, некоторые аспекты энергетической безопасности могут входить в конфликт друг с другом. Так, например, снижение цены на энергоресурсы может быть связано со снижением экологических стандартов добычи углеводородов (а не с повышением эффективности добычи и транспортировки), и наоборот, повышение экологических стандартов добычи и

потребления энергоресурсов ведет при прочих равных к повышению цены на них.

Не все исследователи проблем обеспечения энергетической безопасности придерживаются подхода «4А»: некоторые авторы либо исключают тот или иной пункт из приведенного выше перечня либо, наоборот, включают дополнительные. Так, например, Л. Хьюз [259] рассматривает три аспекта энергетической безопасности: наличие энергетических ресурсов (availability), их стоимость (affordability) и экологическая приемлемость (acceptability). Б. Совакул [341] выделяет пять аспектов энергетической безопасности:

- наличие энергетических ресурсов (availability);
- стоимость энергетических ресурсов (affordability);
- технологическое развитие и эффективность (technological development and efficiency) – сюда относятся качество поставляемой энергии, развитие инновационных энергетических технологий и т.д.;
- социальная и экологическая приемлемость (environment and social sustainability) – сюда относятся минимизация экологического ущерба, снижение выбросов CO<sub>2</sub>, минимизация социального недовольства и др.;
- энергетическая политика государства (regulation and governance) – прозрачная, стабильная энергетическая политика, направленная на развитие энергетических рынков и поддержку внедрения новых технологий является одним из параметров, обеспечивающих энергетическую безопасность.

Не все исследователи согласны с основными принципами подхода «4А». Так Э. Черп и Дж. Джевел [220] критикуют его за то, что он не отвечает на три базовых вопроса:

1. С чьих позиций должна рассматриваться энергетическая безопасность?
2. Какие ценности затрагиваются при обеспечении энергетической безопасности?
3. Какие угрозы энергетической безопасности принимаются во внимание?

Э. Черп и Дж. Джевел предлагают заменить подход «4А» к определению уровня энергетической безопасности подходом, основанным на оценке уровне

уязвимости (vulnerability) ключевых энергетических систем. Под ключевыми энергетическими системами понимаются такие энергетические системы, которые обеспечивают функционирование социально значимых объектов и систем. Ключевые энергетические системы могут быть очерчены в соответствии с географическим и секторальными границами. Уровень энергетической безопасности в предлагаемом подходе обратно пропорционален уровню уязвимости ключевых энергетических систем к стрессам разной природы. Ученые полагают, что такой подход будет более продуктивным в решении проблем энергетической безопасности, поскольку четче очерчивает предметную область исследования. Однако в целом, несмотря на критику, подход «4А» остается достаточно распространенным.

Значительное влияние на развитие концепции энергетической безопасности в период с 2011 г. по настоящее время оказало зарождение и развитие концепции устойчивого развития, базирующейся среди прочего на идее устойчивой энергетики.

Интеграция принципов устойчивой энергетики в концепцию энергетической безопасности впервые нашла свое отражение в принципах обеспечения энергетической безопасности США, сформулированных и применяемых в своей деятельности Департаментом энергетики США:

1. Развитие гибких, прозрачных и конкурентных энергетических рынков, включая рынки газа.
2. Диверсификация энергетических ресурсов, источников и маршрутов и поощрение развития местных источников энергоснабжения.
3. Сокращение выбросов парниковых газов и ускорение перехода к экономике с низким уровнем выбросов углерода в качестве ключевого вклада в устойчивую энергетическую безопасность.
4. Повышение энергоэффективности спроса.
5. Содействие внедрению экологически чистых и устойчивых энергетических технологий и дальнейшие инвестиции в исследования и инновации.

6. Улучшение устойчивости энергетических систем путем содействия модернизации инфраструктуры, помогающей противостоять системным шокам и кибератакам.

7. Внедрение систем реагирования на чрезвычайные ситуации, включая резервы и замещение топлива для стран-импортеров в случае крупных сбоев в энергоснабжении.

Несмотря на то, что на первый взгляд задачи становления устойчивой энергетики не связаны напрямую с задачами обеспечения энергетической безопасности, и даже могут противоречить друг другу, современные исследования данных областей все больше переплетаются между собой. В настоящее время развитие концепции энергетической безопасности направлено не только на нивелирование краткосрочных последствий перебоев в поставках энергоресурсов, но и на долгосрочное поддержание обеспеченности общества энергией за счет развития и внедрения принципов устойчивой энергетики [191, 217, 320]. Возникла ситуация, когда, с одной стороны, развитие ТЭК в соответствии с принципами устойчивой энергетики рассматривается как путь к повышению энергетической безопасности, а с другой – обеспечение долгосрочной энергетической безопасности стран рассматривается как один из критериев становления устойчивой энергетики.

Анализ эволюции концепции энергетической безопасности (табл. 1.1) показал, что со времени зарождения данной концепции и до наших дней она претерпела значительные изменения в сторону постепенного расширения объекта своего содержания, что было вызвано такими факторами, как [107]:

- экономическое развитие общества (усложнение взаимосвязей между субъектами экономики, структурные изменения производства и пр.);
- технологическое развитие общества (появление новых энергоемких технологий и производств, рост роли технологий в обеспечении благосостояния общества и пр.);
- социально-политические изменения (увеличение требований, предъявляемых к качеству жизни населения и т.д.).

Таблица 1.1 – Эволюция концепции энергетической безопасности

События, послужившие толчком к развитию концепции энергетической безопасности	Ключевые положения концепции энергетической безопасности
с 1866 г. по 1914 г.	
Промышленная революция, приведшая к резкому росту потребления энергии.	Энергетическая безопасность определялась наличием легкоизвлекаемых запасов угля, который выступал основным энергетическим ресурсом.
с 1914 г. по 1961 г.	
Мировые войны и другие военные конфликты; быстрый рост промышленного производства.	Энергетическая безопасность определялась наличием запасов углеводородов в стране и надежностью их зарубежных поставок. Энергетическая безопасность рассматривалась преимущественно в контексте практического решения проблем топливоснабжения экономики и армии в условиях военных конфликтов. В качестве основных энергетических ресурсов выступали уголь и нефть.
с 1961 г. по 1990-е гг.	
Нефтяной кризис 1973 г.; резкий рост цен на нефть.	Энергетическая безопасность определялась наличием запасов углеводородов в стране, надежностью их зарубежных поставок и ценой энергоресурсов.
с 1990-х гг. по 2000-е гг.	
Рост общественного интереса к проблемам окружающей среды; принятие в 1992 г. и вступление в силу в 1994 г. конвенции ООН об изменении климата; развитие экологического налогообложения; принятие Киотского протокола в 1997 г.	Энергетическая безопасность определялась наличием запасов углеводородов в стране, надежностью их зарубежных поставок, ценой энергоресурсов и их экологической безопасностью. Формирование в рамках концепции энергетической безопасности подхода «4А».
с 2000-х гг. по настоящее время	
Смена парадигмы социально-экономического развития развитых стран: ориентация на практическое использование принципов устойчивого экономического развития и устойчивой энергетики (введение углеродных налогов, принятие Дохийской поправки к Киотскому протоколу).	Развитие концепции энергетической безопасности в направлении включения в нее таких областей, как качество жизни населения, борьба с изменениями климата, борьба с энергетической бедностью, ориентация на диверсификацию источников энергии.

Источник: составлено автором

Эволюция концепции энергетической безопасности определяет смысловое содержание термина энергетической безопасности. Соответственно, в настоящее время существует достаточно большое количество определений



термина энергетической безопасности, появившихся в результате развития концепции. Б. Совакул [335] приводит перечень из 45 определений энергетической безопасности, даваемых разными учеными и организациями. Большинство из них построены по принципу соединения базовых элементов подхода «4А» с дополнительными элементами, представляющими интерес при проведении конкретных исследований. Наиболее общие и распространенные трактовки понятия энергетической безопасности приведены в табл. 1.2 и расположены от более узкого содержания понятия к более широкому.

Таблица 1.2 – Определения энергетической безопасности

Источник	Определение энергетической безопасности
Блит [216]	Энергетическая безопасность определяется низкими рисками перебоев в поставках доступных по цене энергетических ресурсов.
Блум [217]	Энергетическая безопасность это способность экономики предоставлять достаточные, доступные и экологически устойчивые энергетические услуги, чтобы поддерживать положение максимального всеобщего благосостояния даже в кризисных условиях.
Белецкий [214]	Энергетическая безопасность определяется надежностью и адекватностью поставок энергетических ресурсов по разумным ценам.
Дрексел [230]	Энергетическая безопасность это способность противостоять неблагоприятным воздействиям, вызванным естественными, случайными или преднамеренными событиями, влияющими на системы снабжения и распределения энергии и коммунальных услуг. Энергетическая безопасность обеспечивается тогда, когда системы добычи, производства и распределения энергетических ресурсов, а также устройства конечного потребления обладают пятью характеристиками: доступностью, живучестью, наличием, достаточностью и устойчивостью.
Мартишаускас [300]	Энергетическая безопасность определяется бесперебойными поставками энергетических ресурсов по доступной цене.
Чон [268]	Энергетическая безопасность представляет собой определенный уровень надежности доступа населения к ископаемому топливу с отсутствием воздействия рыночных сговоров на рынке в течение периода не меньше, чем 10 лет.
Сендеров [164]	Энергетическая безопасность это состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, а также от нарушения бесперебойности энергоснабжения.
Фортов [191]	Энергетическая безопасность это надежное обеспечение экономики всеми видами энергии без чрезмерного ущерба окружающей среде и по ценам, отражающим основные экономические принципы.

Доктрина энергетической безопасности РФ [1]	Энергетическая безопасность это состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечивается выполнение предусмотренных национальным законодательством требований к топливо- и энергоснабжению потребителей, а также выполнение экспортных контрактов и международных обязательств страны <sup>1</sup> .
МЭА [236]	Энергетическая безопасность это способность энергетической системы определенной страны оперативно и наилучшим образом реагировать на изменения баланса спроса и предложения, а также динамично развиваться в соответствии с экономическим развитием и необходимостью сохранения качества окружающей среды.
Черп [221]	Энергетическая безопасность это низкая уязвимость жизненно важных (ключевых) энергетических систем.

Источник: составлено автором

Проанализировав существующие определения энергетической безопасности и рассмотрев динамику развития концепции, можно сделать вывод о том, что базовое содержание понятия энергетической безопасности, связанное с надежностью и доступностью поставок энергоресурсов, расширяется в зависимости от целей исследования, а также от географических, политических и социально-экономических особенностей развития рассматриваемой страны или региона. В качестве дополнительных компонентов обычно выступают:

- наличие запасов углеводородов и их разнообразие по видам;
- наличие энергоемких производств в пределах рассматриваемой страны или региона;
- долгосрочный и/или краткосрочный характер рассмотрения;
- улучшение экологической обстановки и борьба с изменением климата;
- уровень диверсификации поставщиков энергоресурсов в страну;
- энергоэффективность экономики.

При этом для стран, характеризующихся зависимостью от поставок энергоресурсов из других стран, в определении энергетической безопасности больше свойственно делать упор на надежность поставок, диверсификацию

<sup>1</sup> Содержание понятий национальной и экономической безопасности раскрыто в таких официальных документах, как Указ Президента РФ от 13 мая 2017 г. N 208 «О Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года» и Указ Президента РФ от 2 июля 2021 г. N 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».

энергобаланса, развитие возобновляемых источников энергии, и, главное, на снижение рисков возможных перебоев в поставках энергоресурсов. Для стран, обладающих большими запасами углеводородов, акцент в большей степени делается на долгосрочные проблемы развития энергетических систем (обеспечение всеобщего доступа к энергии, сокращение традиционных внешних энергетических рынков и выход на новые энергетические рынки, усиление климатической составляющей международной энергетической политики), увеличение энергоэффективности, развитие чистых углеводородных энергетических технологий, а также на обеспечение инвестициями ТЭК.

В рамках настоящего исследования автор, разделяя позицию С. И. Сендерова, будет придерживаться следующего определения энергетической безопасности: энергетическая безопасность – это состояние защищенности граждан, общества, государства и экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энергетическими ресурсами приемлемого качества, а также от нарушения бесперебойности энергоснабжения.

## **1.2. Методические подходы к оценке энергетической безопасности**

Многоаспектность концепции энергетической безопасности в настоящее время обуславливает наличие большого количества показателей, индексов и способов оценки ее уровня, которые характеризуют технические, социально-экономические, финансовые, экологические и др. аспекты функционирования национальных энергетических систем. Так Б. Совакул [332], проведя анализ научной и практической литературы, посвященной методам оценки и анализа энергетической безопасности, выделяет 320 простых и 52 комплексных показателя, которые упомянуты им как индикаторы, используемые при анализе. Следует отметить, что большое количество приведенных Б. Совакулом показателей (как простых, так и комплексных) имеют косвенное отношение к задаче оценки непосредственно энергетической безопасности. Такими показателями, например, являются: колебания валютного курса, количество

автомобилей в стране, средние затраты домохозяйств на электроэнергию, среднегодовое потребление электроэнергии домохозяйствами, средний пробег автомобилей в год, годовой объем продаж кондиционеров (холодильников, компьютеров и т.д.), налоги на выбросы углекислого газа, общественное недовольство строительством новых электростанций и т.д.

Из всего множества существующих показателей тот или иной автор выбирает те, которые наиболее адекватны поставленным целям его исследования, а затем, как правило, экспертным путем, ранжирует их в порядке значимости. Анализ научной литературы, посвященной проблемам оценки энергетической безопасности, проведенный Б. Ангом, показывает большой разброс количества используемых в разных методиках показателей. Количество индикаторов энергетической безопасности, используемых в каждом конкретном исследовании, варьируется от одного до 68. Около 75% исследований, посвященных оценке энергетической безопасности, основываются на использовании не более 20 показателей. Так Э. Кокс использует 18 индикаторов [227], С. Филипович – 9 [239]. Э. Кизел использует 27 индикаторов [274], М. Шиперс и др. в своей работе приводят 63 показателя [326], а Дж. Авгутис и др. [207] – 68 показателей для оценки энергетической безопасности. Исследования, охватывающие более чем 40 показателей, как правило, используют большое количество специфических технических индикаторов.

Основными простыми показателями, характеризующими энергетическую безопасность страны или региона, являются следующие [96, 97]:

1. Соотношение объема добываемых энергоресурсов с объемами их разведанных запасов. Данный показатель характеризует обеспеченность будущих потребностей экономики региона в ископаемом топливе:

$$RPI_i = \frac{P_i}{R_i} \quad (1.1)$$

где  $RPI_i$  – количество лет, на которое хватит запасов  $i$ -го энергоресурса;

$R_i$  – объем добычи  $i$ -го энергоресурса в год;

$P_i$  – объем разведанных запасов  $i$ -го энергоресурса.

Для объективной оценки потребления ископаемого топлива и изменения объемов его разведанных запасов анализ должен осуществляться за ряд лет. Данный показатель является базовым индикатором при анализе уровня энергетической безопасности страны и соответствует критерию «availability» в подходе «4А», то есть характеризует физическое наличие запасов углеводородов.

2. Доля использования невозобновляемых энергоресурсов в топливно-энергетическом балансе. Данный показатель является актуальным для стран, в которых основная доля энергоресурсов импортируется. В таком случае использование собственных источников возобновляемых видов энергии (гидроэлектростанции, электростанции, работающие на энергии приливов и отливов, и т.д.) является своего рода «подушкой безопасности». Для России, обладающей большими запасами природного газа, нефти и угля, расчет данного показателя не актуален.

3. Уровень резервной мощности электрогенерирующих станций. Чем выше значение резервной мощности, тем большая пиковая нагрузка может быть удовлетворена.

4. Энергоэффективность экономики страны. Данный показатель определяется уровнем затрат топлива, выражаемого в тоннах условного топлива (т.у.т.) или в тоннах нефтяного эквивалента (т.н.э.), на 1000 долларов (или рублей) ВВП. Чем выше энергоэффективность экономики, тем меньше ее рост зависит от прироста потребляемых энергоресурсов, и тем выше энергобезопасность региона.

5. Эффективность распределения энергетических объектов и субъектов потребления электроэнергии. Чем ближе находятся друг к другу производители энергоресурсов и энергопотребители, тем ниже затраты на транспортировку топлива и потери электроэнергии при ее передаче.

6. Диверсификация потребляемых энергоресурсов. Чем выше диверсификация энергоресурсов, используемых в энергетике, тем ниже риск

того, что перебой в поставках или значительное уменьшение поставок одного из потребляемых видов энергоресурсов приведет к экономическому кризису.

В работе [296] предлагается рассчитывать показатель *PDFT* (Probability of different fuel type), отражающий вероятность того, что следующий 1 Вт мощности будет произведен в экономике с использованием другого вида топлива:

$$PDFT = 1 - \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (1.2)$$

где  $N$  – количество видов энергоресурсов, используемых в экономике для генерации электроэнергии;

$S$  – доля суммарных мощностей электростанций, использующих  $i$ -ый вид энергоресурса в общей мощности электростанций, используемых в экономике.

Чем выше значение показателя *PDFT*, тем выше диверсификация генерации электроэнергии по видам топлива.

7. Зависимость региона от импорта топлива и электроэнергии. Зависимость региона от импорта топлива и электроэнергии может быть охарактеризована следующим показателем:

$$IW = \frac{gWh_{if} + gWh_i}{gWh_t} \quad (1.3)$$

где  $gWh_{if}$  – объем электроэнергии, выработанной в регионе за счет использования импортного топлива;

$gWh_i$  – объем электроэнергии, выработанной за пределами региона и переданной в регион;

$gWh_t$  – общий объем выработанной и импортированной электроэнергии в регионе.

Чем выше в топливно-энергетическом балансе доля импортного топлива, используемого на электростанциях, тем выше зависимость региона от экономического и политического состояния регионов-партнеров, а значит, тем ниже уровень его энергетической безопасности.

Другим показателем оценки зависимости страны от импорта энергетических ресурсов является индикатор W&J Energy Index, рассматриваемый Л. Данном [232] и рассчитываемый следующим образом:

$$I_t^1 = \left( \sum_i w_{it} \cdot X_{it} \right) \cdot 100 \quad (1.4)$$

$$X_{it} = \frac{C_{it} - I_{it}}{C_{it}} \quad (1.5)$$

где  $w_{it}$  – доля потребления  $i$ -го энергетического ресурса за период  $t$  в структуре потребления энергетических ресурсов страны;

$X_{it}$  – произведенная в стране доля потребленного  $i$ -го энергетического ресурса;

$C_{it}$  – объем потребления  $i$ -го энергетического ресурса за период  $t$ ;

$I_{it}$  – объем импорта  $i$ -го энергетического ресурса за период  $t$ .

Чем выше значение данного индекса, тем ниже зависимость региона от импорта энергетических ресурсов, а значит, тем выше уровень его энергетической безопасности.

8. Диверсификация поставщиков энергоресурсов. Чем выше диверсификация поставщиков энергетических ресурсов, тем ниже риск того, что перебой в поставках или значительное уменьшение поставок от одного из поставщиков энергоресурсов приведет к серьезным последствиям для экономики.

Для оценки степени диверсификации поставщиков энергоресурсов используют два показателя. Первый показатель – индекс Херфиндаля-Хиршмана:

$$HHI = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (1.6)$$

где  $p_i$  – доля поставок энергоресурса  $i$ -м поставщиком, в долях единицы.

Чем выше значения индекса  $HHI$ , тем более монополизирован рынок. Показатель  $HHI$  кроме как в целях оценки диверсификации поставщиков

используют также для оценки диверсификации используемых первичных энергоресурсов.

Вторым показателем, характеризующим диверсификацию поставщиков, является индекс Шеннона:

$$SI = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (1.7)$$

где  $p_i$  – доля поставок энергоресурса  $i$ -м поставщиком, в долях единицы.

Чем выше значение индекса  $SI$ , тем выше диверсификация поставщиков энергоресурсов.

Для одновременной оценки степени диверсификации используемых энергетических ресурсов и импортозависимости в работе [205] предлагается использовать комплексный показатель  $NEID$ :

$$NEID = \frac{\sum_{i=1}^n m_i p_i \ln p_i}{\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i} \quad (1.8)$$

где  $m_i$  – доля  $i$ -го энергоносителя в чистом импорте;

$p_i$  – доля  $i$ -го энергоносителя в общем объеме потребляемых энергоресурсов.

Чем ниже значение индекса  $NEID$ , тем выше при прочих равных энергетическая безопасность региона.

9. Цены на энергоресурсы на мировых рынках. Сама по себе цена на энергоресурс не является показателем энергетической безопасности, но дополнительный анализ ценовой динамики энергоресурса позволяет осуществлять экономическую оценку возможности использования данного энергоресурса для страны.

10. Индекс  $SD$  (supply-demand index). Данный индекс представляет собой отношение предложения на энергетические ресурсы к спросу на них в заданном регионе. Если значение данного индекса выше единицы, и такое соотношение сохраняется на протяжении ряда лет, это означает высокую вероятность



повышения цен на данный энергоресурс в будущем, что может негативно отразиться на уровне энергетической безопасности.

Следует отметить, что в исследованиях, основанных на незначительном количестве рассматриваемых показателей энергетической безопасности, как правило, используются комплексные показатели. Примером может служить рассмотренный в [216] комплексный показатель геополитической энергетической безопасности (*GES*), позволяющий учитывать при оценке энергетической безопасности риск концентрации рынка, политическую стабильность и рыночную ликвидность. Комплексный показатель геополитической энергетической безопасности находится следующим образом:

$$GES = \sum_j \left[ \left( \sum_i r_i \cdot (S_{ij})^2 \right) \cdot e^{(1/P_j)} \right] \cdot \frac{C_j}{TPES} \quad (1.9)$$

где *TPES* (*total primary energy supply*) – общий объем поставляемых энергетических ресурсов;

$C_j$  – объем потребления *j*-го энергетического ресурса;

$\left[ \left( \sum_i r_i \cdot (S_{ij})^2 \right) \cdot e^{(1/P_j)} \right]$  – мера риска концентрации *j*-го энергетического ресурса;

$P_j$  – общий объем предложения на свободном рынке *j*-го энергетического ресурса;

$r_i$  – политический риск *i*-ой страны, ранжируемый от 0 до 100;

$S_{ij}$  – доля *i*-го поставщика-страны *j*-го вида энергетического ресурса, определяемая на основе его чистого экспортного потенциала.

Другим комплексным показателем, используемым для оценки энергетической безопасности, является предложенный К. Ле и Е. Пальцевой [283] показатель рискованности внешних поставок энергоресурсов REES (*Risky External Energy Supply*), который основан на расчете доли импорта топлива, взаимозаменяемости импорта, оценке политического риска, расстояния между странами-поставщиками и потребителями и зависимости от импорта.

$$REES_a^j = SF_a^j \cdot \sum_i \left( \frac{NPI_{ai}^j}{C_a^j} \right)^2 \cdot r_i \cdot d_{ia} \quad (1.10)$$

где  $SF_a^j$  – доля  $j$ -го энергетического ресурса в энергетическом балансе  $a$ -й страны;

$NPI_{ai}^j$  – нетто-импорт  $j$ -го энергетического ресурса из  $i$ -й страны в  $a$ -ю страну;

$r_i$  – политический риск  $i$ -й страны;

$C_a^j$  – объем потребления  $j$ -го энергетического ресурса;

$d_{ia}$  – расстояние между  $i$ -й и  $a$ -й странами.

Для каждого типа энергетического ресурса показатель  $REES$  дает оценку того, насколько надежны поставки данного энергетического ресурса в страну. Поскольку значение показателя уменьшается с уменьшением количества поставщиков и расстоянием стран-контрагентов и увеличивается с ростом политических рисков, более высокие значения  $REES$  соответствуют более высоким уровням риска поставок энергетических ресурсов.

Недостатки большинства комплексных показателей связаны, во-первых, со сложностью их интерпретации, во-вторых, с их недостаточной объективностью. Сложность интерпретации возникает, когда на основе вышеприведенных показателей осуществляется сравнение положения ряда государств. В этом случае без дополнительного анализа сложно сказать, по каким причинам та или иная страна отстает по уровню энергетической безопасности, и из-за изменения каких факторов произошло увеличение или уменьшение уровня ее энергетической безопасности. Недостаточная объективность показателей происходит из субъективности экспертной оценки некоторых величин, используемых в расчетах. В связи с этим, несмотря на наличие комплексных показателей надежности поставок энергетических ресурсов, на практике при оценке уровня энергетической безопасности страны или региона чаще используются относительно простые и легко интерпретируемые показатели.

Поскольку в рамках современной концепции энергетической безопасности существуют разные подходы к ее оценке, существенно отличающиеся как количеством используемых показателей, так и процедурами их обработки и интерпретации, анализ существующих подходов оценки энергетической безопасности позволил выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на выбор используемых показателей:

- период времени, на который проводится оценка;
- наличие у страны статуса нетто-импортера или нетто-экспортера энергетических ресурсов;
- приоритеты исследователя, отдаваемые тем или иным аспектам энергетической безопасности;
- совокупность краткосрочных и стратегических угроз энергетической безопасности, которые являются наиболее актуальными для рассматриваемой страны и/или региона.

Первым выделенным фактором является период времени, на который проводится оценка: краткосрочный или долгосрочный. В первом случае большее внимание уделяется неожиданным стрессовым ситуациям, которые прерывают на том или ином этапе процесс добычи, преобразования, транспортировки, распределения и потребления энергетических ресурсов. Для анализа краткосрочной энергетической безопасности используют показатели, характеризующие технические и ресурсные резервы рассматриваемой системы, экономические и социальные последствия краткосрочных перерывов в поставках топлива, вероятность наступления тех или иных неблагоприятных ситуаций и т.д.

При анализе надежности функционирования энергетической системы в долгосрочном периоде во внимание исследователя попадают стратегические риски, развертывающиеся постепенно и приводящие к нежелательным структурным изменениям в ТЭК и/или экономике. В этом случае для оценки энергетической безопасности страны важными становятся сложившиеся траектории развития национальной энергетической системы, национальной

экономики, мировой экономики и энергетики, развития новых технологий и динамики их внедрения и др. Анализу подлежат фундаментальные экономические и социальные явления, которые, с одной стороны, влияют на развитие ТЭК, а с другой, - по цепочке обратных связей сами определяются динамикой развития национальной энергетики. При оценке долгосрочной энергетической безопасности ключевыми показателями становятся энергоёмкость, темпы роста экономики в целом и ее структурных элементов в частности, динамика развития ТЭК страны, динамика изменения структуры ТЭК, темп обновления основного капитала и пр.

В табл. 1.3 приведены некоторые основные показатели, используемые при оценке энергетической безопасности в рамках подхода «4А», сгруппированные в зависимости от продолжительности рассматриваемого периода.

Таблица 1.3 – Основные показатели, используемые при оценке энергетической безопасности в рамках подхода «4А», сгруппированные в зависимости от продолжительности рассматриваемого периода

	Краткосрочный период	Долгосрочный период
Наличие (availability)	Резервы углеводородов, наличие альтернативных источников топливоснабжения, резервы генерирующих мощностей	Доказанные запасы энергетических ресурсов
Ценовая доступность (affordability)	Ценовая волатильность	Динамика долгосрочных ценовых трендов
Физическая доступность (accessibility)	Наличие производственных мощностей в ТЭК, степень развития транспортной инфраструктуры	Динамика ввода новых производственных мощностей в ТЭК
Экологическая приемлемость (acceptability)	Количество выбросов в результате производственных аварий	Изменение климата и загрязнение окружающей среды в результате функционирования экономики и промышленности

Источник: составлено автором

Вторым фактором, определяющим выбор используемых для анализа уровня энергетической безопасности показателей, является объем запасов энергетических ресурсов в стране. От объема запасов энергетических ресурсов в стране зависит наличие у страны статуса нетто-импортера или нетто-экспортера энергетических ресурсов. Данный фактор является одним из

ключевых при выборе и/или разработки новой методики анализа уровня энергетической безопасности. Статус нетто-импортера энергетических ресурсов сильно расширяет перечень актуальных и потенциальных угроз энергетической безопасности страны и смещает акцент с анализа проблем развития национальной энергетики и экономики на анализ положения стран-поставщиков. Таким образом, в поле внимания исследователя оказываются уровень политической стабильности, уровень развития энергетики, объем запасов углеводородов, безопасность транспортных маршрутов стран-поставщиков и т.д.

В табл. 1.4 приводятся некоторые основные показатели, используемые при оценке энергетической безопасности в рамках подхода «4А», сгруппированные в зависимости от статуса нетто-импортера или нетто-экспортера энергетических ресурсов.

Таблица 1.4 – Основные показатели, используемые при оценке энергетической безопасности в рамках подхода «4А», сгруппированные в зависимости от статуса нетто-импортера или нетто-экспортера энергетических ресурсов

	Нетто-импортер	Нетто-экспортер
Наличие (availability)	Потенциальный объем возобновляемых источников энергии, доля импорта различных энергетических ресурсов в структуре потребления первичных ТЭР.	Запасы нефти, запасы угля, запасы природного газа.
Ценовая доступность (affordability)	Волатильность цен на мировых энергетических рынках.	Себестоимость добычи и переработки энергетических ресурсов.
Физическая доступность (accessibility)	Количество газопроводов и нефтепроводов, через которые производится импорт ТЭР, количество поставщиков углеводородов, политическая стабильность стран-контрагентов.	Установленная мощность электростанций, перерабатывающая мощность НПЗ, объемы добычи углеводородов, соотношения внутреннего спроса и предложения энергетических ресурсов.
Экологическая приемлемость (acceptability)	Объем выбросов загрязняющих веществ в стране.	Показатели ущерба окружающей среды при добыче углеводородов, объем выбросов загрязняющих веществ в стране.

Источник: составлено автором

Третьим фактором, определяющим выбор используемых для анализа уровня энергетической безопасности показателей, выступают приоритеты исследователя, отдаваемые тем или иным аспектам энергетической безопасности. Появление данного фактора является результатом изменения парадигмы энергетического развития, происходящего в мире в течение последних 10-15 лет. В результате акценты при определении энергетической безопасности могут быть сделаны на:

- надежности поставок энергетических ресурсов (традиционный подход);
- энергоэффективности экономики;
- борьбе с энергетической бедностью;
- экологической безопасности;
- военной безопасности;
- цене энергетических ресурсов и возможности их резкого роста.

Еще одним фактором, непосредственно влияющим на выбор используемых показателей, является совокупность краткосрочных и стратегических угроз энергетической безопасности, которые являются наиболее актуальными для рассматриваемой страны и/или региона (табл. 1.5). Другими словами, подверженность разных стран и регионов мира разным угрозам энергетической безопасности определяет различия в системах показателей, используемых для оценки их энергетической безопасности.

Таблица 1.5 – Классификация угроз энергетической безопасности

	Краткосрочные	Долгосрочные
Технические и технологические угрозы	Аварии	Физическое и моральное устаревание основного оборудования, моральное устаревание технологий производства
Человеческий фактор	Террористические акты, политическая нестабильность	Просчеты в энергетической и экономической политике страны
Природные угрозы	Стихийные бедствия	Исчерпаемость ресурсов, загрязнение окружающей среды
Экономические угрозы	Краткосрочные дисбалансы спроса и предложения на товарных рынках, приводящие к краткосрочным труднопрогнозируемым колебаниям цен	Системные финансово-экономические кризисы, дефицит инвестиций в ТЭК, экономические санкции

Источник: составлено автором

Следует отметить, что два последних фактора сильно взаимосвязаны. Приоритеты исследователя в значительной степени определяются наиболее актуальными угрозами энергетической безопасности страны или региона. Выделяя наиболее актуальные угрозы, исследователи, тем самым, расставляют собственные приоритеты и из всего многообразия показателей выбирают те, которые в полной мере описывают и оценивают вероятность наступления и последствия реализации той или иной краткосрочной или долгосрочной угрозы. Несмотря на то, что, как правило, при описании того или иного подхода к оценке энергетической безопасности данные факторы явно не обозначаются, они оказывают определяющую роль при выборе используемых показателей и индикаторов.

Многие из рассмотренных выше показателей легли в основу существующих в международной практике подходов и методов оценки энергетической безопасности. Рассмотрим некоторые из них.

Для анализа краткосрочной энергетической безопасности стран-членов Международного энергетического агентства Дж. Джевел [270] предлагает метод оценки под названием MOSES (Model of Short-term Energy Security). Данный подход, ориентированный исключительно на страны-импортеры энергетических ресурсов, затрагивает проблемы физической бесперебойности поставок энергетических ресурсов и полностью упускает такие аспекты, как экологическая безопасность, энергоэффективность, структурные изменения экономики и энергетики, то есть аспекты, представляющие интерес в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

В модели MOSES все показатели энергетической безопасности предлагается классифицировать по критериям, представленным в табл. 1.6.

Таблица 1.6 – Классификация показателей энергетической безопасности в MOSES

	Риск	Устойчивость
Внешние	показатели риска, связанные с потенциальной остановкой поставок импортируемых энергоресурсов	показатели, характеризующие способность энергетических систем и экономики адаптироваться к перебоям в поставках импортируемых энергоресурсов за счет замены поставщиков
Внутренние	показатели риска, характеризующие состояние внутригосударственной инфраструктуры и производства	показатели, характеризующие способность энергетических систем и экономики адаптироваться к перебоям в поставках импортируемых энергоресурсов за счет внутренних ресурсов и резервов

Источник: [270]

Оценка энергетической безопасности страны заключается в анализе значений 35 показателей, определяемых для основных видов энергетических ресурсов, поставляемых в рассматриваемую страну. Например, для нефти такими показателями являются импортозависимость, политическая стабильность поставщика, количество путей экспорта нефти (количество портов и нефтепроводов), разнообразие поставщиков, доля морской добычи нефти, волатильность добычи внутри страны, средний уровень запасов нефти в стране. Значения показателей определяются экспертным или статистическим методом. Затем значения выделенных по каждому энергетическому ресурсу показателей ранжируются по уровню риска: низкий риск энергетической безопасности; средний риск; высокий риск (табл. 1.7). На следующем этапе определяется уровень надежности поставок по данному энергетическому ресурсу в страну и формулируется общий вывод об уровне энергетической безопасности страны.



Таблица 1.7 – Ранжирование значений показателей, характеризующих поставки нефти в страну

	Индикатор	Уровень риска			
		низкий	средний	высокий	
Внешний риск	Импортная зависимость	$\leq 15\%$	40%-65%	$\geq 80\%$	
	Политическая стабильность поставщика	$< 2,5\%$	$\geq 2,9\%$		
Внутренний риск	Волатильность добычи	$< 20\%$	$> 20\%$		
	Доля морской добычи	$< 15\%$	$> 90\%$		
Внешняя гибкость	Разнообразие поставщика	$< 0,3\%$	0,3-0,8	$> 0,8\%$	
	Импортная инфраструктура	Порты	$\geq 5$	2	1
		Трубопроводы	$\geq 9$	3-4	2
Внутренняя гибкость	Уровень запасов	$\geq 55$	20-50	$\geq 15$	

Источник: [270]

Описываемый подход к оценке энергетической безопасности имеет весьма ограниченную сферу применения и не затрагивает такие важные аспекты функционирования энергетических систем, как структура генерирующих мощностей, наличие резервов генерирующих мощностей, динамику изменений, происходящих в ТЭК страны и т. д. Данный метод имеет ценность только для решения ограниченного круга практических задач, к числу которых относится, например, оценка уровня краткосрочной энергетической безопасности стран, импортирующих энергетические ресурсы.

Другой подход к оценке энергетической безопасности предлагается Мировым энергетическим советом (World Energy Council, WEC) - созданным в 1923 г. и являющимся аккредитованным ООН органом, занимающимся проблемами мировой энергетики. WEC на протяжении ряда лет дает ежегодные оценки уровня энергетической безопасности 125 стран мира. Оценка энергетической безопасности основывается на идее «энергетической трилеммы» (рис. 1.3), включающей следующие элементы:

– энергетическая безопасность (energy security) – эффективное управление поставками первичных энергетических ресурсов из внутренних и

внешних источников, надежность энергетической инфраструктуры и доступность поставщиков энергии для удовлетворения текущих и будущих потребностей;

– энергетическое равенство (energy equity) – физическая и ценовая доступность энергии для населения;

– экологическая устойчивость (environment sustainability) – возобновляемые источники энергии, энергоэффективность, экологически чистые энергетические технологии.



Рисунок 1.3 – «Энергетическая трилемма» Мирового энергетического совета

Источник: [357]

Для оценки выделенных элементов рассчитываются значения индикаторов состояния национальной энергетической системы, которые затем учитываются при расчете итогового индекса (*Energy Trilemma Index*). Схема расчета индекса представлена на рис. 1.4 Показатели и их веса, используемые при расчете, приведены в табл. 1.8.



Рисунок 1.4 – Схема расчета индекса *Energy Trilemma Index*

Источник: составлено автором по [357]

Таблица 1.8 – Показатели и их веса, используемые при расчете индекса *Energy Trilemma Index*

Категория индикаторов (вес)	Индикаторы	Вес
<b>Энергетическая безопасность (energy security) (30%)</b>		
Безопасность энергоснабжения и разнообразие (15%)	Разнообразие источников (поставщиков) первичной энергии	5,0%
	Энергоемкость ВВП	5,0%
	Импортная зависимость	5,0%
Гибкость (15%)	Запасы энергоресурсов	5,0%
	Готовность к освоению	5,0%
	Разнообразие источников электроэнергии	5,0%
<b>Энергетическое равенство (energy equity) (30%)</b>		
Доступность (10%)	Доступность электроэнергии	5,0%
	Доступность чистого пищевого приготовления	5,0%
Качество энергоснабжения (10%)	Качество электроэнергии	5,0%
	Качество снабжения населения	5,0%
Приемлемость и конкурентоспособность (10%)	Цены на электроэнергию	3,3%
	Цены на моторное топливо	3,3%
	Цены на газ	3,3%

<b>Экологическая устойчивость (environment sustainability) (30%)</b>		
Продуктивность энергоресурсов (10%)	Эффективность потребления энергии	5,0%
	Эффективность генерации электроэнергии	5,0%
Эмиссия парниковых газов (10%)	Тенденция выбросов CO <sub>2</sub>	5,0%
	Изменения площади лесов	5,0%
Эмиссия CO <sub>2</sub> (10%)	Эмиссия CO <sub>2</sub>	3,3%
	Эмиссия CO <sub>2</sub> на человека	3,3%
	Эмиссия CO <sub>2</sub> от электростанций	3,3%
<b>Особенности страны (10%)</b>		
Политическая устойчивость и предсказуемость (2%)	Эффективность правительства	0,5%
	Политическая стабильность	0,5%
	Уровень коррупции	0,5%
	Состояние макроэкономики	0,5%
Стабильность условий (обстановки) (2%)	Выполнение законов	0,7%
	Качество управления	0,7%
	Качество политического руководства	0,7%
Условия развития технологий и инноваций (2%)	Возможности для инноваций	0,5%
	Количество патентов	0,5%
	Защита интеллектуальной собственности	0,5%
	Возможности внедрения	0,5%
Условия для инвестиций (2%)	Иностранные инвестиции	1,0%
	Легкость организации бизнеса	1,0%
Загрязнение воздуха, земли и воды (2%)	Борьба с загрязнением воды и с отходами	1,0%
	Борьба с загрязнением воздуха	1,0%

Источник: составлено автором по [357]

Оценкой энергетической безопасности стран также занимается Всемирный экономический форум (WEF). Данная организация с 2013 г. публикует отчеты «The Global Energy Architecture Performance Index Report», в которых представлена оценка энергетической безопасности 127 стран мира. В методике, используемой для анализа, определяются значения 18 показателей, которым приписываются соответствующие веса (табл. 1.9). Определяемые показатели характеризуют три элемента энергетической безопасности: экономический рост; экологическую устойчивость; энергетическую доступность. Затем на базе данных показателей рассчитывается итоговый комплексный индикатор энергетической безопасности «Global Energy Architecture Performance Index» (*GEAPI*).

Таблица 1.9 – Показатели, используемые Всемирным экономическим форумом для анализа уровня энергетической безопасности

Характеристика	Индикаторы	Веса
Экономический рост (0,33)		
Энергоэффективность	Энергоемкость ВВП	0,25
Стимулирование экономического роста	Стоимость импорта энергетических ресурсов (% от ВВП)	0,125
	Объем экспорта энергетических ресурсов (% от ВВП)	0,125
Доступность	Степень искажения цен на бензин на мировом рынке (индексы)	0,15
	Степень искажения цен на дизельное топливо на мировом рынке (индексы)	0,15
	Цены на электроэнергию для промышленности	0,25
Экологическая устойчивость (0,33)		
Влияние на окружающую среду	Доля альтернативной и атомной энергии	0,2
	Эмиссия CO <sub>2</sub> от электростанций	0,2
	Объем выбросов метана в ТЭК	0,1
	Удельный расход топлива в автомобилях	0,2
	Объем выбросов оксида азота	0,1
	Индекс РМ 2.5	0,1
Энергетическая безопасность и доступность (0,33)		
Уровень электроснабжения	Уровень электрификации (% населения)	0,2
	Качество электроснабжения	0,2
	Процент населения, использующего твердое топливо для приготовления пищи	0,2
Диверсификация поставок	Диверсификация источников снабжения первичными энергоресурсами	0,1 (0,2)
Самообеспечение	Уровень зависимости от импорта энергетических ресурсов	0,2
	Диверсификация импорта	0,1

Источник: составлено автором по [244]

Анализ уровня энергетической безопасности США осуществляется Глобальным энергетическим институтом (Global Energy Institute) [264]. Общая оценка уровня энергетической безопасности основывается на расчете комплексного показателя Index of US Energy Security Risk (*USES*R), базирующегося на расчете 37 отдельных индексов, относящихся к 9 группам:

1. Мировой рынок топлива. В данную группу входят индексы, характеризующие надежность поставок и запасов нефти, природного газа и

угля; безопасность мировых запасов нефти; безопасность мировой добычи нефти; безопасность мировых запасов природного газа; безопасность производства природного газа в мире; безопасность мировых запасов угля; безопасность мирового производства угля.

2. Импорт энергетических ресурсов. В данную группу входят индексы, характеризующие чувствительность национальной экономики к ненадежным поставкам энергетических ресурсов: безопасность импортных поставок нефти в США; безопасность импортных поставок газа в США; расходы на импорт нефти и природного газа; расходы на импорт нефти и природного газа в процентах к ВВП.

3. Затраты на энергетические ресурсы. В данную группу входят индексы, характеризующие объем затрат на энергию в экономике, а также чувствительность населения к ценовым шокам: расходы на энергетические ресурсы в процентах к ВВП; средние расходы домохозяйств на энергетические ресурсы; розничная цена электроэнергии; цена на нефть.

4. Цены и волатильность рынка энергетических ресурсов. В данную группу входят индексы, характеризующие чувствительность национальной экономики к изменениям цен на энергетические ресурсы: волатильность цен на нефть; волатильность энергозатрат; уровень использования нефтеперерабатывающих заводов в мире; уровень запасов нефти.

5. Энергоемкость. В данную группу входят индексы, характеризующие энергоэффективность национальной экономики: потребление энергии на душу населения; энергоемкость; объем потребляемой нефти; энергоэффективность домохозяйств; коммерческая эффективность использования энергии; промышленная энергетическая эффективность.

6. Электроэнергетика. В данную группу входят индексы, характеризующие надежность электроснабжения: уровень диверсификации типов генерирующих мощностей; резервы генерирующих мощностей; протяженность линий электропередач.

7. Транспортный сектор. В данную группу входят индексы, характеризующие эффективность потребления топлива в транспортном секторе: средний расход топлива; количество проезженных миль на 1000 долл. ВВП; использование топлив на транспорте, кроме полученных из нефти.

8. Окружающая среда. В данную группу входят индексы, характеризующие обязательства страны по ограничению выбросов загрязняющих веществ: выбросы  $\text{CO}_2$  в ТЭК; выбросы  $\text{CO}_2$  в расчете на одного жителя; эффективность потребления энергетических ресурсов в аспекте выбросов  $\text{CO}_2$ ; доля электроэнергии выработанной без выбросов  $\text{CO}_2$ .

9. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы: расходы на НИОКР; расходы на НИОКР федерального правительства; количество людей с академическими степенями.

Следует отметить, что текущие значения всех индикаторов в подходе определяются посредством их соотнесения с состоянием энергетики США в 1980 г. То есть 1980 г. выступает базисным годом, в котором значения всех индикаторов соответствуют 100.

Анализ научной и практической литературы, посвященной вопросам оценки энергетической безопасности зарубежом, показал, что основными элементами анализа уровня энергетической безопасности являются:

- оценка надежности поставок энергетических ресурсов в регион с упором на степень зависимости энергетики региона от импортных поставок энергетических ресурсов;
- оценка экономической эффективности и экологической приемлемости функционирования как национальных энергетических систем, так и отдельных энергетических технологий.

Все большая роль при оценке уровня энергетической безопасности в зарубежных методиках отводится критерию диверсификации: диверсификация видов используемых энергетических ресурсов, диверсификация типов генерирующих мощностей, диверсификация поставщиков, диверсификация транспортных путей и др. При этом анализу производственного потенциала

ТЭК в процессе оценки энергетической безопасности страны уделяется крайне незначительное внимание. Процесс производства и потребления энергии укрупненно состоит из следующих этапов: добыча и транспортировка первичных энергетических ресурсов, преобразование, передача, распределение, потребление. Анализ международных методик оценки уровня энергетической безопасности показал, что акцент в них делается на этапе добычи и транспортировки энергетических ресурсов, а также на этапе потребления энергии, который рассматривается в контексте эффективности конечного использования энергетических услуг. Проблемы преобразования энергетических ресурсов в электроэнергию и тепловую энергию, а также передачи и распределения произведенной энергии, таким образом, являются вторичными. Для России, которая обладает одними из самых больших запасов углеводородов и при этом имеет большие территории с неравномерным распределением населения, напротив, наиболее актуальными этапами процесса производства и потребления энергии при оценке энергетической безопасности являются этапы преобразования и транспортировки энергетических ресурсов.

Еще одной особенностью зарубежных методик оценки энергетической безопасности является отсутствие разграничения между краткосрочной и долгосрочной энергетической безопасностью. Единственной методикой, оценивающей безопасность энергоснабжения в краткосрочной перспективе является модель MOSES, которая в явном виде ориентирована на оценку краткосрочных, неожиданных и связанных с физическими перерывами в поставках топлива угроз. Большинство других методик или вообще не разделяют краткосрочные и долгосрочные угрозы в методиках оценки, или разделяют их, но без каких либо поправок в используемых способах оценки.

Россия обладает большими запасами энергоресурсов и значительным производственным потенциалом ТЭК, позволяющим добывать первичные энергоресурсы не только для внутреннего потребления, но и на экспорт. По всем основным показателям энергетической безопасности, принятым в мировой практике, Россия имеет высокий уровень энергетической безопасности. В то же



время исследования показывают, что отечественный топливно-энергетический комплекс имеет ряд особенностей и проблем (большая неравномерно населенная территория; устаревание основных производственных фондов; технологическое отставание отраслей ТЭК России от мировых конкурентов и др.) [138, 161, 162, 170], которые, снижая способность российской энергетической системы сопротивляться разного рода стрессовым ситуациям, создают угрозу долгосрочной энергетической безопасности страны.

Большая работа по развитию теории оценки энергетической безопасности страны и регионов России проведена в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН такими учеными, как С. М. Сендеров, Л. В. Массель, В. И. Рабчук, Н. И. Пяткова, Н. И. Воропай и др. [120, 151-154, 163, 165, 166]. Основным результатом проведенных исследований стала разработка метода индикативного анализа уровня энергетической безопасности регионов, включающего в себя этап сопоставления значений индикаторов с их пороговыми значениями, который позволяет сопоставлять уровни энергетической безопасности разных регионов и исследовать динамику их изменения.

Оценка состояния энергетической безопасности региона базируется на расчете системы индикаторов, сгруппированных в три блока (табл. 1.10).

Таблица 1.10 – Состав важнейших индикаторов энергетической безопасности региона

Блок	Индикаторы
Блок производственной и ресурсной обеспеченности системы топливно- и энергоснабжения региона	Отношение суммарной располагаемой мощности электростанций региона к максимальной электрической нагрузке потребителей на его территории; Отношение суммы располагаемой мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей региона с соседними к максимальной электрической нагрузке потребителей на территории; Возможность удовлетворения потребностей потребителей в котельно-печном топливе из собственных источников региона.
Блок надежности топливно- и энергоснабжения региона	Доля доминирующего ресурса в общем объеме потребления котельно-печного топлива на

	территории региона; Доля наиболее крупной электростанции в установленной электрической мощности региона; Уровень потенциальной обеспеченности спроса на топливо в условиях резкого похолодания (10%-е увеличение потребления) на территории региона.
Блок состояния основных производственных фондов энергетики на территории региона	Степень износа ОПФ энергетического хозяйства региона; Отношение среднегодового ввода установленной мощности и реконструкции электростанций региона за последние 5 лет к установленной мощности региона.

Источник: [153]

Пороговые значения для индикатора «Отношение суммарной располагаемой мощности электростанций региона к максимальной электрической нагрузке потребителей на его территории» (табл. 1.11) ранжируются для выделенных четырех групп регионов:

- суммарная мощность возможных перетоков электроэнергии с соседними регионами не менее 50% от установленной в регионе электрической мощности;
- суммарная мощность возможных перетоков электроэнергии с соседними регионами от 20% до 30% от установленной в регионе электрической мощности;
- суммарная мощность возможных перетоков электроэнергии с соседними регионами не более 20% от установленной в регионе электрической мощности;
- изолированные регионы.

Группировка регионов для определения пороговых значений индикатора «Отношение суммы располагаемой мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей региона с соседними к максимальной электрической нагрузке потребителей на территории» осуществляется следующим образом:

- регионы с развитой транспортной инфраструктурой, соединяющей его с регионами с большими запасами угля и газа;
- регионы с развитой транспортной инфраструктурой, соединяющей его с регионами с большими запасами угля;
- регионы со слабо развитой транспортной инфраструктурой.

Группировка регионов для определения пороговых значений индикатора «Доля доминирующего ресурса в общем объеме потребления котельно-печного топлива на территории региона» осуществляется следующим образом:

- регионы с самообеспечением котельно-печным топливом;
- регионы с незначительными запасами энергетических ресурсов.

Группировка регионов для определения пороговых значений индикатора «Доля наиболее крупной электростанции в установленной электрической мощности региона» такая же, как и для индикатора «Отношение суммарной располагаемой мощности электростанций региона к максимальной электрической нагрузке потребителей на его территории».

Группировка регионов для определения пороговых значений индикатора «Уровень потенциальной обеспеченности спроса на топливо в условиях резкого похолодания (10%-е увеличение потребления) на территории региона» осуществляется следующим образом:

- регионы с мягким климатом;
- регионы с умеренным климатом;
- регионы с холодным климатом.

Таблица 1.11 – Пороговые значения ряда индикаторов энергетической безопасности

Группа регионов	Состояние		
	Приемлемое	Предкризисное	Кризисное
	Отношение суммарной располагаемой мощности электростанций региона к максимальной электрической нагрузке потребителей на его территории		
1	>0,5	0,3-0,5	<0,3
2	>0,7	0,5-0,7	<0,5
3	>1	0,8-1	<0,8
4	>1.2	1,1-1,2	<1,1
	Отношение суммы располагаемой мощности электростанций и пропускной		

способности межсистемных связей региона с соседними к максимальной электрической нагрузке потребителей на территории			
1	>40%	20%-40%	<20%
2	>60%	40%-60%	<40%
3	100	80%-100%	<80%
Доля доминирующего ресурса в общем объеме потребления котельно-печного топлива на территории региона			
1	<90%	>90%	-
2	<40%	40%-70%	>70%
Доля наиболее крупной электростанции в установленной электрической мощности региона			
1	<50%	50%-70%	>70%
2	<40%	40%-50%	>50%
3	<30%	30%-40%	>40%
Уровень потенциальной обеспеченности спроса на топливо в условиях резкого похолодания (10%-е увеличение потребления) на территории региона			
1	>100%	80%-100%	<80%
2	>100%	90%-100%	<90%
3	>100%	100%	<100%

Источник: [153]

Общая схема установки пороговых значений следующая: чем ниже возможность перетока электроэнергии из соседних регионов, тем при прочих равных должна быть выше установленная мощность в рассматриваемом регионе для покрытия возможных пиковых нагрузок. В таблице 1.12. приведены пороговые значения индикаторов без группировки рассматриваемых регионов.

Таблица 1.12 – Пороговые значения ряда индикаторов энергетической безопасности без группировки рассматриваемых регионов

Индикатор	Состояние		
	Приемлемое	Предкризисное	Кризисное
Отношение суммы располагаемой мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей региона с соседними к максимальной электрической нагрузке потребителей на территории	>1,5	1,2	<1,2
Степень износа ОПФ энергетического хозяйства региона	<40%	40%-60%	>60%
Отношение среднегодового ввода установленной мощности и реконструкции электростанций региона за последние 5 лет к установленной мощности региона	>2	2-3	<1

Источник: [153]

Ранжирование значений используемых индикаторов предлагается осуществлять следующим образом:

$$f(S_i) = \begin{cases} H, & S_i < S_i^{ПК} \\ ПК, & S_i^{ПК} \leq S_i < S_i^K \\ K, & S_i \geq S_i^K \end{cases} \quad i = 1, n \quad (1.11)$$

где  $n$  – количество рассматриваемых индикаторов;

$S_i$  – фактическое (ожидаемое) значение  $i$ -го индикатора;

$S_i^{ПК}$ ,  $S_i^K$  – значения предкризисного и кризисного пороговых значений  $i$ -го индикатора;

$H$ ,  $ПК$ ,  $K$  – значения индикатора, соответствующее нормальному, предкризисному и кризисному состоянию соответственно.

Для получения интегральной оценки состояния энергетической безопасности необходимо определить удельные веса рассчитываемых индикаторов:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n v_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij}} \quad (1.12)$$

где  $V_i$  – удельный вес  $i$ -го индикатора в системе оцениваемых индикаторов;

$v_{ij}$  – условная значимость  $i$ -го индикатора в сравнении с  $j$ -м индикатором.

Значение условной значимости ( $v_{ij}$ ) определяется экспертным способом. В табл. 1.13 приведена матрица сравнительных характеристик условной значимости индикаторов энергетической безопасности.

Таблица 1.13 – Матрица сравнительных характеристик условной значимости индикаторов энергетической безопасности

1	$V_{12}$	$V_{13}$	...	$V_{1n}$
$V_{21}$	1	$V_{23}$	...	$V_{2n}$
$V_{31}$	$V_{32}$	1	...	$V_{3n}$
...	...	...	1	...
$V_{n1}$	$V_{n2}$	$V_{n3}$	...	1

Источник: [153]

Для интегральной оценки энергетической безопасности используется следующий алгоритм:

$$Q_u = \begin{cases} H, & \sum_{i=1}^n V_i^H \geq \delta_H \\ PK, & \sum_{i=1}^n V_i^K < \delta_K \text{ и } \sum_{i=1}^n V_i^H < \delta_H, \quad i = 1, n \\ K, & \sum_{i=1}^n V_i^K \geq \delta_K \end{cases} \quad (1.13)$$

где  $Q_u$  – интегральная оценка качественного состояния энергетической безопасности по индикативной оценке;

$V_i^H, V_i^K$  – удельный вес  $i$ -го индикатора, находящегося в области нормальных и кризисных значений соответственно;

$\delta_H, \delta_K$  – коэффициенты, характеризующие уровень достижения нормального или кризисного состояния соответственно.

Для оценки энергетической безопасности России на федеральном уровне используют следующую систему показателей:

1. Отношение годового прироста балансовых запасов первичных топливно-энергетических ресурсов к объему их добычи. В данную группу входит четыре индикатора, рассчитанных для нефти, газа, угля и урана, со следующими пороговыми значениями: для нефти и газа: предкризисное – 1,0, кризисное – 0,95; для угля: предкризисное – 0,75, кризисное – 0,5; для урана: предкризисное – 1,2, кризисное – 1,1.

2. Доля природного газа в структуре баланса первичных топливно-энергетических ресурсов. Пороговые значения индикатора: предкризисное – 0,50, кризисное – 0,55.

3. Динамика уровня цен внутри страны на нефть, газ, уголь и уран. Для нефти, угля и урана пороговые значения составляют: предкризисное –  $1,01 +$  индекс инфляции; кризисное –  $1,03 +$  индекс инфляции. Для газа пороговые значения составляют: предкризисное –  $1,05 +$  индекс инфляции; кризисное –  $1,1 +$  индекс инфляции.

4. Выполнение инвестиционных программ отраслями ТЭК. В группу входят пять показателей (с пороговыми значениями 0,9 и 0,7), определяемых в сфере добычи и транспорта нефти и газового конденсата, в нефтепереработке, в газовой промышленности, в угольной отрасли, в электроэнергетике.

5. Относительное изменение величины удельной энергоемкости ВВП (предкризисное – 0,97; кризисное – 0,98).

6. Стабильность обеспечения потребителей различными видами топливно-энергетических ресурсов. В данную группу включены 8 индикаторов, 5 из которых являются показателями суммарной недопоставки газа, угля, топочного мазута, светлых нефтепродуктов, электроэнергии, а 3 – это показатели, характеризующие степень удовлетворения спроса на котельно-печное топливо, тепловую энергию и электроэнергию в условиях резкого похолодания.

Использование вышеприведенного метода является одним из этапов процесса анализа текущего состояния отраслей ТЭК и разработки мероприятий развития национальной энергетики с целью повышения уровня энергетической безопасности страны, который реализуется с использованием разработанного в ИСЭМ СО РАН комплекса оптимизационных и имитационных моделей энергетических отраслей. На рис. 1.5 отражен общий алгоритм исследований энергетической безопасности страны. Видно, что индикативная оценка энергетической безопасности страны и региона выступает начальным этапом стратегического планирования развития ТЭК страны и регионов.



Рисунок 1.5 – Алгоритм исследований энергетической безопасности страны

Источник: [153]

Используемая методика оценки энергетической безопасности и применяемый инструментарий разработки стратегических мероприятий, направленных на увеличение надежности функционирования национальной энергетики упускает из виду такие аспекты обеспечения энергетической безопасности, как борьба с энергетической бедностью, развитие устойчивой энергетики, развитие адаптивных свойств энергетических систем, а также развитие финансово-экономических механизмов обеспечения роста энергетической безопасности страны. Однако в современных условиях большую роль в обеспечении энергетической безопасности играет уровень развития национальной экономики и энергетического хозяйства. Поэтому



наряду с общепризнанными показателями энергетической безопасности должны быть разработаны показатели, характеризующие финансово-экономические аспекты функционирования энергетического хозяйства, которые прямо или косвенно в долгосрочной и среднесрочной перспективе влияют на энергетическую безопасность страны.

### **1.3. Актуальные направления развития методологии обеспечения энергетической безопасности России**

Несмотря на большое количество исследований в области оценки уровня энергетической безопасности и разработки мер ее обеспечения, фундаментальные процессы в мировой энергетике и экономике (включающие развитие устойчивой энергетики, международную экономическую интеграцию, усиление геополитической напряженности, цифровизацию экономики и энергетики, развитие возобновляемых источников энергии, рост экологических требований, развитие новых технологий) в сочетании с ростом неопределенности и рисков функционирования отечественной экономики и энергетики, а также с моральным и физическим устареванием основных производственных фондов в российском ТЭК, обуславливают необходимость дальнейшего развития методологии решения стратегических задач долгосрочного обеспечения энергетической безопасности России. Фундаментальность данных процессов определяет необходимость смещения в процессе управления энергетическими системами с целью обеспечения долгосрочной энергетической безопасности акцентов с текущего технического состояния систем, физической надежности производства и транспортировки энергетических ресурсов на построение адаптивных и устойчивых энергетических систем, быстро подстраивающихся к изменениям условий их функционирования. Таким образом, для обеспечения долгосрочной энергетической безопасности усилия исследователей должны быть направлены не только на анализ текущего состояния энергетической системы и существующих взаимосвязей экономики и энергетики, но и на обеспечение

способности энергетической системы адекватно реагировать на происходящие в экономике и энергетике изменения, в том числе меняя собственную структуру и устанавливая новые взаимосвязи между ее элементами [295].

Решение актуальных проблем обеспечения энергетической безопасности России может быть осуществлено посредством развития теории принятия решений в энергетике в условиях высокой неопределенности исходных данных, роста рисков, а также возрастания роли инвестиций в обеспечении функционирования и развития энергетических систем. В условиях либерализации мировых энергетических рынков и примата частных инвестиций в современной экономике возможность решения долгосрочных проблем обеспечения энергетической безопасности определяется не только разработкой и реализацией научно-обоснованных и оптимизированных вариантов стратегического развития ТЭК, но и развитием финансово-экономических механизмов для эффективного и устойчивого развития энергетических систем, способных быстро адаптироваться как к краткосрочным стрессовым ситуациям, так и к долгосрочным изменениям внешней среды.

Описанные выше тенденции взаимосвязаны в процессе реализации одной из важнейших стратегических угроз долгосрочной энергетической безопасности России – дефицита инвестиций в экономике и энергетике. Долгосрочный самоусиливающийся процесс развертывания стратегической угрозы дефицита инвестиций обуславливается:

- взаимным влиянием фундаментальных процессов, протекающих в мировой энергетике и экономике;
- ростом неопределенности и рисков функционирования отечественной экономики и энергетике.

Механизм долгосрочного самоусиливающегося процесса развертывания стратегической угрозы дефицита инвестиций в экономике и энергетике представлен на рисунке 1.6.

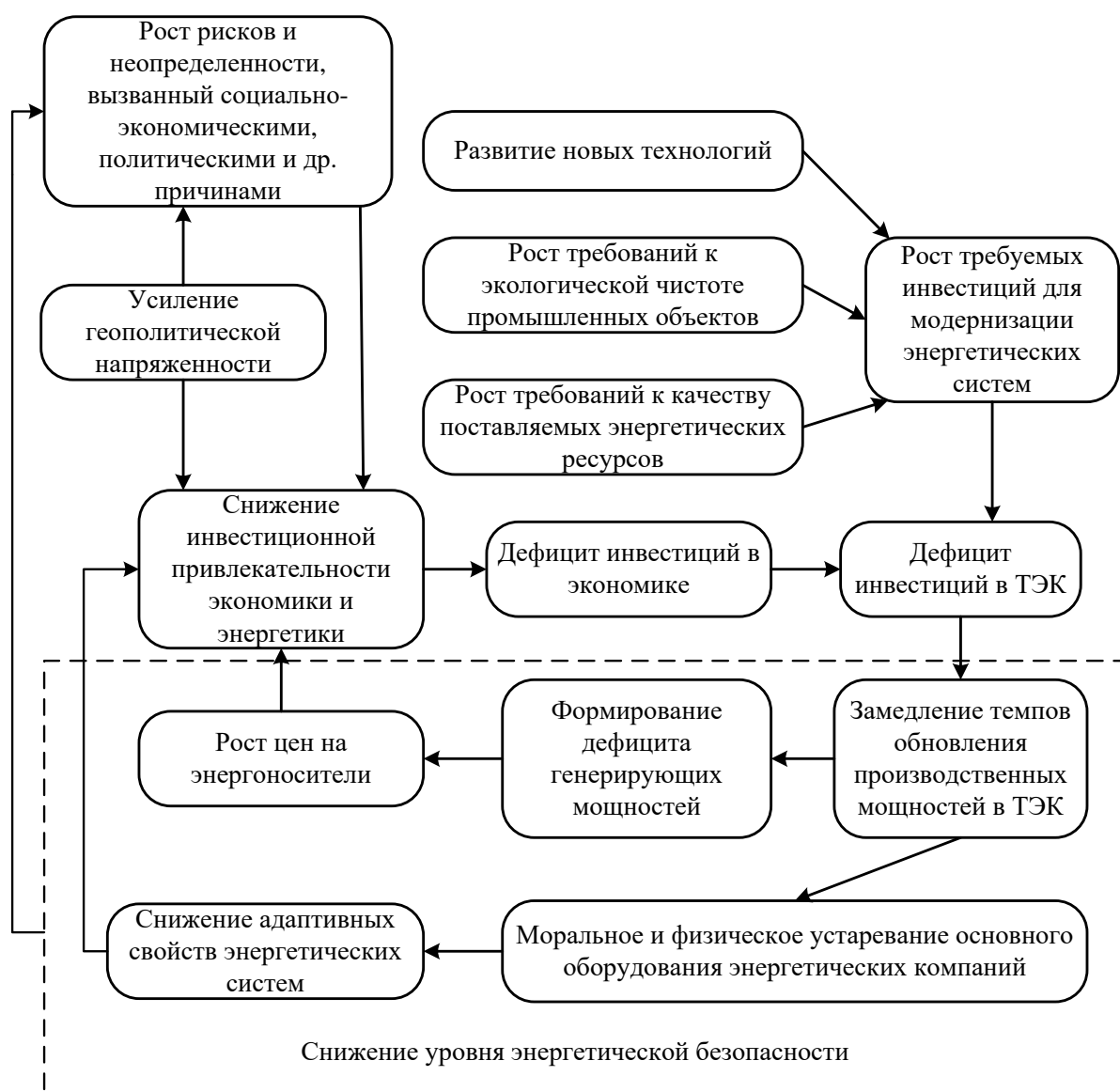


Рисунок 1.6 – Долгосрчный самоусиливающийся процесс развертывания стратегической угрозы дефицита инвестиций в экономике и энергетике

Источник: составлено автором

Из рисунка 1.6 видно, что низкий уровень инвестиционной привлекательности экономики и энергетики, обусловленный ростом неопределенности и реализацией социально-экономических, политических и иных рисков, в сочетании с ростом требуемых инвестиций, необходимых для модернизации ТЭК в направлении развития устойчивой энергетики, приводят к дефициту инвестиций в экономике и энергетике, моральному и физическому устареванию основных производственных мощностей ТЭК, что, в свою

очередь, по цепочке экономических связей приводит к замедлению экономического роста и дальнейшему снижению инвестиционной привлекательности экономики и энергетики страны.

Одной из главных причин дефицита инвестиций в экономику и энергетику является низкая инвестиционная привлекательность экономики России в целом и топливно-энергетического комплекса в частности (ввиду особенностей функционирования российского топливно-энергетического комплекса его инвестиционная привлекательность напрямую зависит от инвестиционной привлекательности экономики страны).

Стратегическая угроза дефицита инвестиций в энергетику, реализация которой есть результат низкой инвестиционной привлекательности экономики России и высоких рисков, уже привела к проблеме морального и физического устаревания основных производственных фондов ТЭК. Так за последние 30 лет наблюдался значительный рост среднего возраста электростанций (табл. 1.14). Порядка 90% мощностей действующих электростанций, 70% магистральных нефтепроводов, 70% котельных, 66% тепловых сетей, 46% газоперекачивающих агрегатов находятся в эксплуатации более 20 лет [135], а количество вводимых новых мощностей недостаточно: коэффициент обновления за последние годы составлял 2% (4% для нефтедобычи).

Таблица 1.14 – Средний срок службы электростанций в России, лет

Вид электростанций	1990	2000	2010	2015
ГЭС	21	25	32	33
АЭС	9	14	17	18
Паротурбинные электростанции	20	22	28	30
Газотурбинные электростанции	8	10	9	11
Парогазовые электростанции	-	-	4	7

Источник: [135]

Высокая степень износа основных фондов создает опасность крупных аварий, сопровождающихся загрязнением окружающей среды, и сбоев в энергоснабжении, а также значительно усложняет процесс повышения энергоэффективности российской экономики. Кроме того, отставание темпов

развития производственных мощностей ТЭК (в частности электрогенерирующих) от темпов развития экономики, способное в будущем привести к росту цен на энергоносители на внутреннем рынке и замедлению экономического роста, значительно повышает риск снижения уровня долгосрочной энергетической безопасности страны.

Поскольку инвестиции являются неотъемлемой составляющей обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны, инвестиционная привлекательность ТЭК может служить одним из индикаторов уровня энергетической безопасности. Однако несмотря на достаточно большой список показателей, характеризующих уровень энергетической безопасности страны, в настоящее время в нем не нашел отражения такой аспект, как инвестиционная привлекательность капиталовложений в топливно-энергетический комплекс.

Проблема формирования благоприятного инвестиционного климата и обеспечения топливно-энергетического комплекса инвестиционными ресурсами находится в тесной взаимосвязи с проблемой роста неопределенности и рисков функционирования энергетических систем. В современных условиях в качестве основных причин роста неопределенности мировой экономики и энергетики можно выделить следующие:

1. Усиление геополитической напряженности.
2. Политическая нестабильность в странах ближнего Востока, которые являются крупными экспортерами нефти.
3. Высокий темп научно-технического прогресса, приводящий к увеличению неопределенности относительно технологий, которые будут использоваться в будущем.
4. Сильная интеграция на мировой арене реальных и финансовых инвестиций, приводящая к тому, что высокая неопределенность и волатильность, свойственная финансовым рынкам, «перекидывается» на реальный сектор экономики, в результате чего в характере управления производственными единицами происходят существенные изменения.

5. Рост значимости экологических и экономических последствий перебоев в поставках энергетических ресурсов, обусловленный глобализацией и усложнением социально-экономических и технических взаимосвязей между структурными элементами экономики и энергетики.

Повышение неопределенности и рисков функционирования мировой экономики и энергетики оказывает воздействие на формирование долгосрочной траектории развития энергетических систем (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Механизм влияния неопределенности исходных данных на развитие ТЭК

Источник: составлено автором

Неопределенность исходных данных, связанных с условиями функционирования современных энергетических систем, по-разному влияет на энергетические системы разного уровня, отличающиеся степенью технической сложности и географическим расположением [293]. На рисунке 1.8 уровни ТЭК

соотнесены с экономическими параметрами, неопределенность которых в большей степени влияет на них [93].

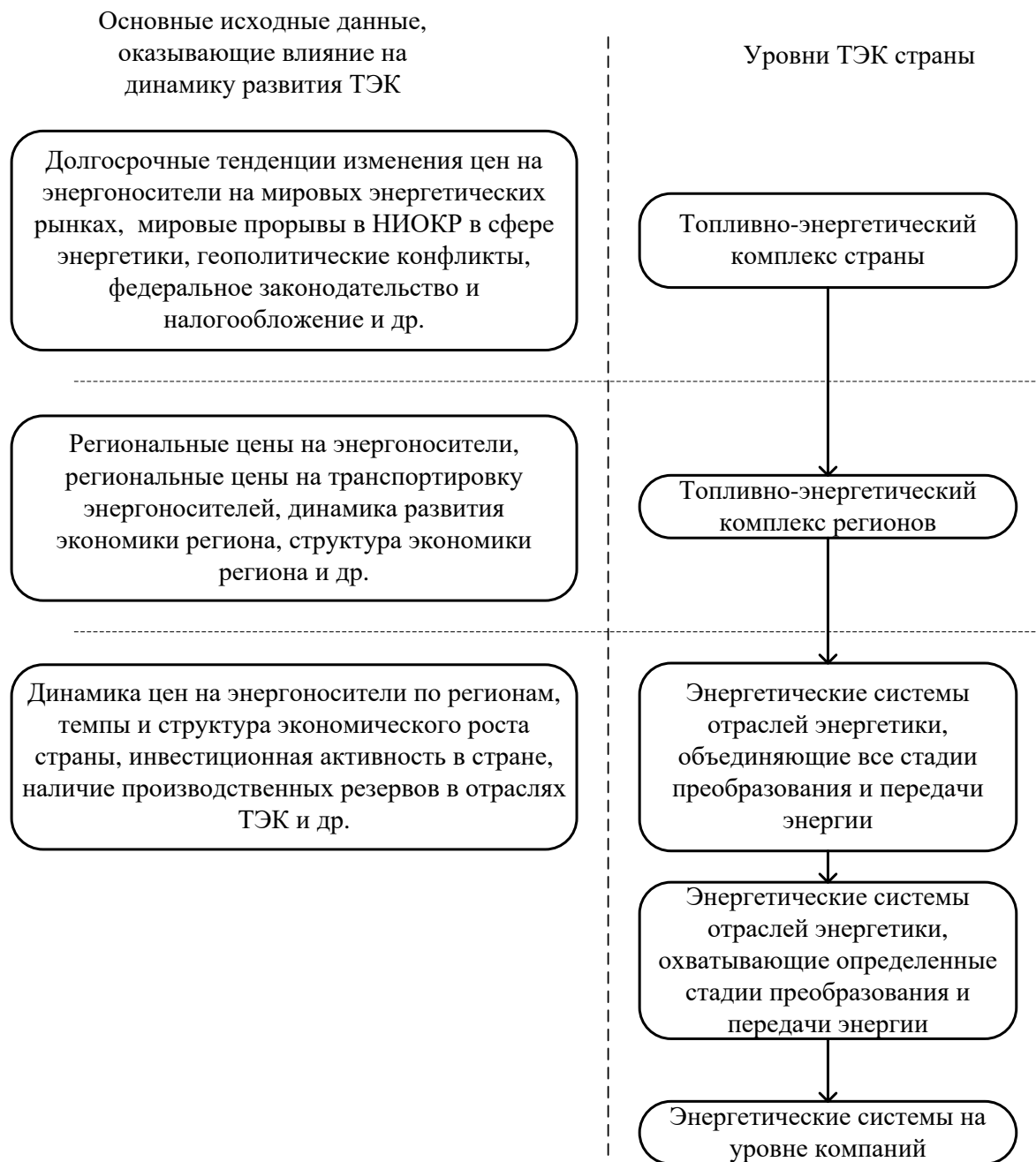


Рисунок 1.8 – Уровни ТЭК и экономические параметры, неопределенность которых в большей степени влияет на них

Источник: составлено автором

Основными факторами, влияющими на траекторию развития ТЭК, являются спрос и цены на энергоносители, поскольку в данном случае работает основной принцип экономического развития: рост спроса и/или цены на товар

стимулирует при прочих равных условиях рост предложения этого товара. Соответственно, производство или добыча энергоносителя, на который растет спрос и/или цена, увеличивается, а производство энергоносителей, на которые спрос и/или цена падает, уменьшается. В результате под действием рыночных факторов меняется производственная структура ТЭК. Неопределенность исходных данных не оказывает первостепенное влияние на траекторию развития ТЭК, уступая по значимости таким факторам, как динамика цены и спроса на энергоносители в экономике, темпы роста отечественной и мировой экономики. Однако в периоды экономической нестабильности и высокой неопределенности основных макроэкономических показателей, фактор неопределенности исходных данных и возрастающих рисков приобретает большую значимость и должен быть учтен при выработке мер, направленных на рост уровня энергетической безопасности [94]. Без учета неопределенности исходных данных сложно получить достоверные результаты относительно развития как ТЭК, так и экономики страны в целом. Место оценки уровня неопределенности и рисков в процессе анализа динамики развития ТЭК представлено на рисунке 1.9.

Последствия негативного воздействия неопределенности и рисков функционирования энергетических систем, угрожающих надежности энергоснабжения в условиях постоянных флуктуаций и долгосрочных неблагоприятных изменений внешней среды, могут быть минимизированы с помощью такого свойства развивающихся и открытых систем, как адаптивность, в общем случае представляющего собой способность систем меняться, адаптируясь к неблагоприятным изменениям внешней среды, для сохранения своей целостности и эффективности функционирования.



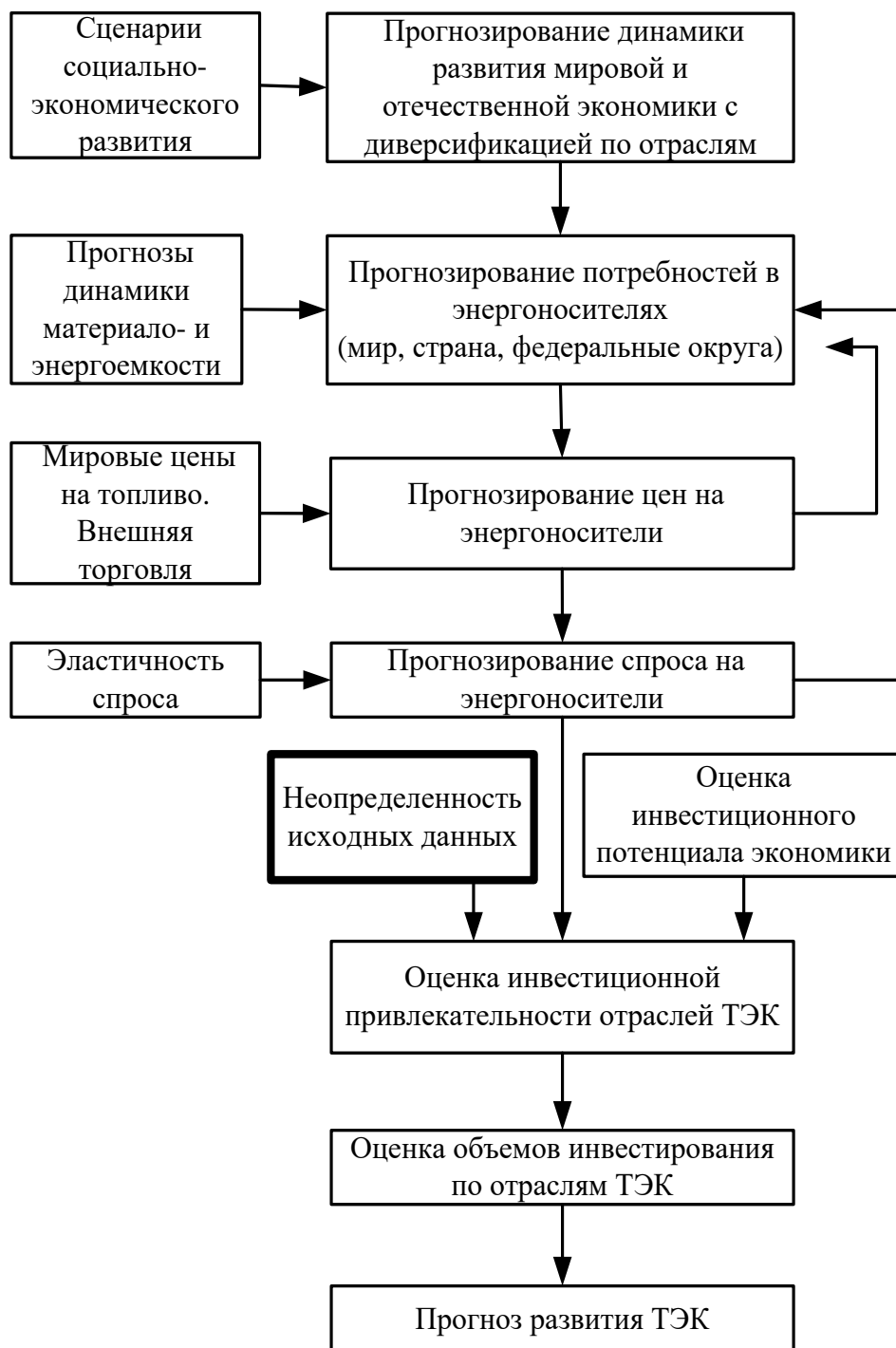


Рисунок 1.9 – Место оценки и учета неопределенности исходных данных при прогнозировании динамики развития ТЭК

Источник: составлено автором

Дальнейшее развитие методологии обеспечения энергетической безопасности должно осуществляться с учетом взаимосвязи уровней адаптивности энергетических систем и инвестиционной привлекательности

энергетики и экономики: инвестиционная привлекательность энергетики создает условия для привлечения финансирования адаптационных мероприятий, в то время как высокий уровень адаптивности национальной энергетической системы снижает инвестиционные риски, тем самым повышая инвестиционную привлекательность экономики и энергетики. Оценка инвестиционной привлекательности энергетики в значительной степени основывается на оценке условий реализации крупномасштабных инвестиционных проектов в ТЭК, что потребует развития методов оценки капиталовложений и рисков в энергетике в соответствии со стоящими задачами обеспечения энергетической безопасности страны.

Важным этапом процесса разработки стратегического сценария развития ТЭК, направленного на повышение энергетической безопасности, должна стать разработка мер по снижению влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения. Конечной целью решения проблем обеспечения энергетической безопасности является повышение качества жизни населения. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных взаимосвязи уровня качества жизни населения и объема потребления энергетических ресурсов, недостаточно изученными остаются механизм влияния реализации угроз энергетической безопасности на уровень благосостояния и качество жизни населения, проблемы оценки данного влияния и разработки способов его нивелирования.

Учитывая все вышесказанное, одним из направлений развития методологии решения проблем обеспечения энергетической безопасности, включающей среди прочего способы оценки и принятия управленческих решений в ТЭК, является интеграция в алгоритм решения проблем обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны таких элементов, как анализ неопределенности и рисков, анализ адаптивности, анализ инвестиционной привлекательности экономики и энергетики и анализ влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Алгоритм обеспечения долгосрочной энергетической безопасности

Источник: составлено автором

Совершенствование методологии решения проблем обеспечения энергетической безопасности России посредством развития методов анализа свойства адаптивности энергетических систем в сочетании с использованием методов инвестиционного анализа для оценки возможности финансирования адаптационных мероприятий и структурных изменений ТЭК позволит повысить качество информации, используемой при формировании стратегических планов развития национальной энергетики, а исследование механизма влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения поможет повысить обоснованность принимаемых стратегических решений, направленных на повышение долгосрочной энергетической безопасности страны.

**Выводы по первой главе.** Для достижения цели диссертационного исследования в главе были решены следующие задачи:

– проанализировать содержание концепции энергетической безопасности, проследить эволюцию концепции и определить основные факторы и события, определившие данную эволюцию;

– на основе анализа существующих методических подходов к оценке энергетической безопасности, а также текущих тенденций развития экономики и энергетики определить актуальные направления развития методологии обеспечения энергетической безопасности России.

В результате проведенного исследования получена целостная картина эволюции концепции энергетической безопасности за всю историю ее существования. Впервые были выделены этапы эволюции данной концепции.

Изменение смыслового содержания понятия энергетической безопасности было рассмотрено на фоне происходящих исторических событий и анализа социально-экономической ситуации в тот или иной период. На основе анализа существующих определений энергетической безопасности и динамики развития концепции, сделан вывод о том, что базовое содержание понятия энергетической безопасности, связанное с надежностью и доступностью поставок энергоресурсов, расширяется в зависимости от целей исследования, а также от географических, политических и социально-экономических особенностей развития рассматриваемой страны или региона.

Были рассмотрены существующие показатели и методические подходы к оценке уровня энергетической безопасности стран и регионов, что позволило выделить факторы, определяющие как процедуры оценки, так и выбор из всего множества релевантных показателей совокупности индикаторов, используемых каждым конкретным исследователем.

Анализ эволюции концепции энергетической безопасности, анализ имеющих зарубежных и отечественных методических подходов к оценке энергетической безопасности, а также исследование стратегических угроз энергетической безопасности России позволили выявить актуальные

направления развития методологии обеспечения энергетической безопасности. Было показано, что дальнейшее развитие методологии обеспечения энергетической безопасности должно осуществляться посредством интеграции в алгоритм обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны таких элементов, как анализ неопределенности и рисков, анализ адаптивности, анализ инвестиционной привлекательности экономики и энергетики и анализ влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения.

## ГЛАВА 2. СВОЙСТВО АДАПТИВНОСТИ КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ

### 2.1. Свойство адаптивности энергетических систем

Развитие методов обеспечения энергетической безопасности входит в один ряд с такими направлениям исследований больших систем энергетики, как: оценка эффективности функционирования ТЭК страны, формирование оптимальных вариантов развития энергетики, прогнозирование развития энергетических систем, а также разработка мер оптимизации энергетического хозяйства в соответствии с меняющимися условиями. Многие исследователи [10, 17, 19, 20, 22, 33, 36, 81, 116] заявляют о том, что усложнение взаимосвязей экономики и энергетики, развитие новых энергетических технологий, увеличение политической напряженности, рост неопределенности на международных энергетических рынках и другие фундаментальные изменения приводят к необходимости развития теории управления большими системами энергетики. Существующие методы принятия решений в энергетике и модели, описывающие взаимосвязи экономики и энергетики, должны модернизироваться с учетом меняющихся условий.

Несмотря на большой интерес к развитию теории управления большими системами энергетики и, в том числе, к вопросам обеспечения энергетической безопасности, такому свойству энергетических систем, как адаптивность не было уделено достаточного внимания. Адаптивность является фундаментальным свойством, присущим всем открытым и развивающимся системам, однако только в последние десятилетия свойство адаптивности стало приниматься во внимание при анализе и планировании развития энергетических систем. Проводимые в настоящее время исследования подчеркивают важность такой характеристики современных энергетических систем, как адаптивность [114, 260, 342], но в то же время не предлагают какой-либо определенной методологии управления адаптивностью в рамках решения проблем обеспечения энергетической безопасности. Иными словами, развитие

теории адаптивности энергетических систем и учет данного свойства все еще не рассматриваются как необходимые составляющие процесса управления большими системами энергетики, а также решения проблем уязвимости национальной экономики к реализации стратегических угроз энергетической безопасности страны.

Экономическая система любого уровня организации (город, регион, федеральный округ, страна) в процессе своего функционирования и развития нуждается в поставках энергетических ресурсов. При этом экономическая система стабильно функционирует и развивается тогда, когда ее спрос на энергию обеспечивается в полном объеме. Снабжение энергией, воплощенной в энергетических ресурсах, происходит за счет работы энергетической системы, которая, по определению Л. А. Мелентьева и Е. О. Штейнгауза, в общем виде представляет собой совокупность энергоустановок (генерирующих, преобразующих, передающих, аккумулирующих, потребляющих), соединенных между собой энергетическими связями таким образом, что условия эксплуатации этих установок влияют друг на друга [125, 126].

Если экономика и энергетика работают в условиях относительной стабильности, когда энергетическая система обеспечивается ресурсами, а экономика, в свою очередь, получает достаточное количество энергетических ресурсов по приемлемой цене, система не испытывает стресса. Однако когда происходит некоторое событие, природа которого может быть разнообразной, энергетическая система испытывает стресс, способный привести к полной остановке работы энергетической системы, перебоям поставок энергетических ресурсов, значительному повышению цены на энергию, снижению экономической эффективности работы энергетических компаний. Возвращение системы к первоначальному состоянию (или переход к новому состоянию, соответствующему изменившимся условиям функционирования системы) становится возможным благодаря своевременному проведению адаптационных мероприятий (рис. 2.1.).



Рисунок 2.1 – Адаптационный процесс

Источник: составлено автором

Внешняя среда постоянно меняется, и именно благодаря адаптивным свойствам система подстраивается под новые условия. Происходит изменение внутренней структуры в виде появления новых элементов и взаимосвязей, которые меняют функциональные характеристики системы. В общем виде под адаптивностью системы понимается свойство, позволяющее системе функционировать в условиях стрессовых ситуаций, или другими словами, позволяющее системе противостоять стрессам.

Наиболее распространенные определения понятия «адаптивность» приведены в таблице 2.1.



Таблица 2.1 – Определения понятия «адаптивность системы»

Определение	Источник
Адаптивность (устойчивость) системы – это способность системы возвращаться в исходное (или желаемое) состояние после стрессовой ситуации.	Лин [286]
Адаптивность системы – это способность системы противостоять серьезным нарушениям в ее работе и восстанавливаться в течение приемлемого времени и с приемлемыми затратами.	Хэймс [250]
Адаптивность системы – это качество или свойство системы восстанавливать свою функциональность.	Молиньо [308]
Адаптивность системы – это способность системы противостоять стрессам, продолжая функционировать.	Молиньо [307]
Адаптивность системы – это способность системы: 1) противостоять неожиданным и случайным ситуациям без катастрофических последствий, 2) реагировать на эти ситуации и 3) восстанавливаться после них.	Рокас [322]
Адаптивность системы – это наличие определенного уровня стрессоустойчивости, позволяющего поглощать флуктуации внешней среды, сохраняя структуру и другие характеристики функционирования системы. Подразумевается, что система может перейти к новому режиму (новому состоянию равновесия), пока ее структура и характеристики неизменны.	Шарифи [329]
Адаптивность системы – это способность системы поглощать возмущения и реорганизовываться с целью сохранения собственных функций, структуры, идентичности и обратных связей.	Волкер [351]
Адаптивность системы – это мера способности систем воспринимать изменения среды и сохранять свою функциональность.	Холинг [257]
Адаптивность системы – это способность системы вернуться к нормальному состоянию функционирования после возникновения стрессового события.	Вииг [354]
Адаптивность – это способность системы приспосабливаться к изменениям внешней и внутренней среды.	Карпович [60]
Адаптация – это процесс приспособления хозяйственной системы/субъекта к изменениям, возникающим во внешней и внутренней среде ее/его функционирования посредством выработки особых адаптационных механизмов.	Миэринь [129]

Источник: составлено автором

В процессе адаптации происходят технические и организационные изменения работы энергетической системы, благодаря которым система подстраивается к изменяющимся внешним и внутренним условиям, продолжая эффективно обеспечивать потребности экономики в энергетических ресурсах посредством оптимизации структуры электрогенерирующих мощностей, формирования заданной структуры потребления первичных энергоресурсов,

достижения оптимального объема и направлений поставок энергоресурсов как внутри региона, так и за его пределами.

В отношении возможности достижения поставленных целей любая экономическая, социальная или производственная система тем более жизнеспособна и эффективна, чем более она адаптивна. Данное правило подходит и к энергетическим системам разного уровня организации: чем выше уровень адаптивности, тем больший стресс может пережить энергетическая система.

Уровень адаптивности энергетической системы является обратной величиной уровня ее уязвимости (*vulnerability*). Уровень уязвимости системы – это степень возмущения среды, при котором система перестает полностью или частично функционировать. Критическое возмущение среды представляет собой такое неблагоприятное изменение, при котором энергетическая система не может адекватно отреагировать на стрессовую ситуацию, что приводит к неспособности обеспечить требуемый рынком объем поставок энергетических ресурсов.

Понятие «адаптивность» близко по содержанию к таким понятиям, как «гибкость» и «устойчивость». Так гибкость энергетической системы характеризует ее возможность «поглощать» неблагоприятные события за счет внутренних резервов. То есть чем выше запас прочности системы, чем большими резервами разной природы она обладает, тем она более гибка. Под устойчивостью энергетической системы понимается ее способность подстраиваться под изменяющиеся внешние и внутренние условия без привлечения дополнительных затрат. Данная ситуация возможна за счет того, что внутренние резервы и ресурсы могут быть использованы для реорганизации, и первоначальный вариант развития энергетических систем может быть несколько изменен. Разница между устойчивостью и адаптивностью системы заключается в том, что свойство адаптивности системы предполагает ее возможность структурно и организационно изменяться с использованием внутренних ресурсов, резервов и с привлечением

дополнительных вложений. То есть адаптивные механизмы задействуют не только внутренние резервы системы (как в случае с механизмами обеспечения устойчивости), но и ресурсы, которые могут быть привлечены на коммерческой основе извне (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Особенности проявления свойств гибкости, устойчивости и адаптивности систем

Сила стресса	Свойство системы	Характеристика
Низкая или средняя	гибкость	Система продолжает эффективно функционировать за счет наличия внутренних резервов разной природы
Умеренная	устойчивость	Система продолжает эффективно функционировать за счет наличия внутренних резервов, а также за счет способности к самоорганизации
Значительная	адаптивность	Система восстанавливает эффективность своего функционирования за счет осуществления адаптационных мероприятий, требующих дополнительных затрат

Источник: составлено автором

Определения, применяемые в настоящем исследовании, близки определениям, данным А. И. Карповичем. Исследуя проблемы моделирования экономической устойчивости энергетических систем, под устойчивостью А. И. Карпович понимает способность системы в условиях флуктуаций обеспечивать реализацию, поддержание на определенных уровнях своих целевых установок [60]. Под гибкостью системы понимается «способность адаптироваться без структурных изменений, например, путем создания разных видов избыточности (резервов производственных мощностей, запасов сырья, материалов, топлива и т.д.)» [61, с. 156]. Адаптивность, по его мнению, выступает способностью системы приспосабливаться к изменениям внешней и внутренней среды.

У зарубежных авторов понятия адаптивности (*adaptability*) и устойчивости (*resilience*) четко не разграничиваются, более того, понятие адаптивности используется крайне редко. Из ученых, занимающихся решением проблем обеспечения энергетической безопасности и четко разграничивающих эти два понятия, можно назвать Л. Хьюза [261]. Л. Хьюз выделяет следующие различия между данными понятиями: устойчивость – возвращает систему в докризисное

состояние; адаптивность – изменяет систему так, что она продолжает нормально функционировать в новых условиях. Данные определения по содержанию совпадают с принятыми в настоящем исследовании, за исключением того, что Л. Хьюз не уточняет, за счет каких средств (внутренних или внешних) происходит адаптационное изменение системы или ее возврат в докризисное состояние.

Таким образом, адаптивность является более широким понятием, включающим в себя понятия гибкости и устойчивости. При этом уровень адаптивности также определяется факторами, обеспечивающими и гибкость, и устойчивость системы (рис. 2.2).

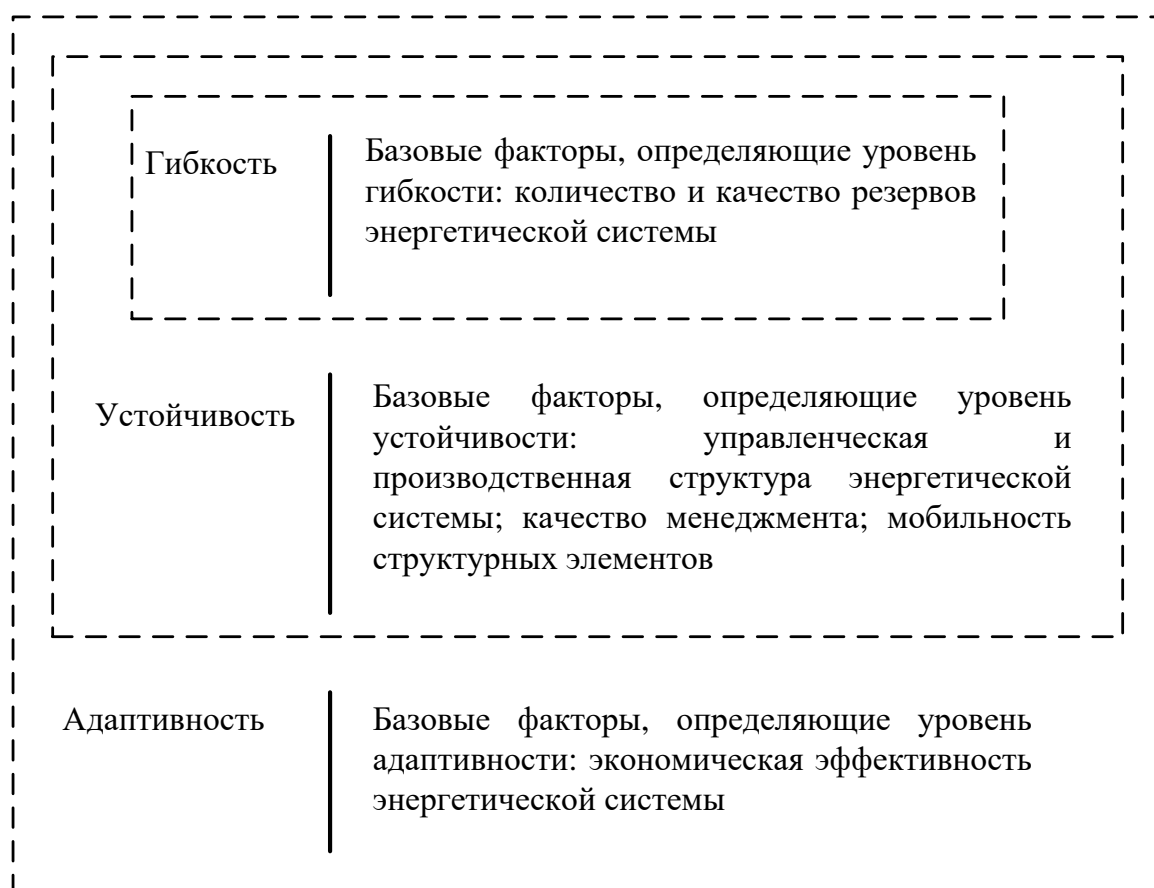


Рисунок 2.2 – Взаимосвязь свойств адаптивности, устойчивости и гибкости системы

Источник: составлено автором

Значительные научные и практические результаты в области анализа адаптивности энергетических систем были получены В. А. Смирновым [174,

175]. Эти результаты, с одной стороны, являются полезными для современных исследований, с другой стороны, их надо пересматривать в контексте текущего положения вещей, поскольку В. А. Смирнов рассматривал адаптивность энергетической системы как ее способность под влиянием внешних возмущений с использованием дополнительных затрат выполнять поставленный план по выпуску продукции (рис. 2.3).

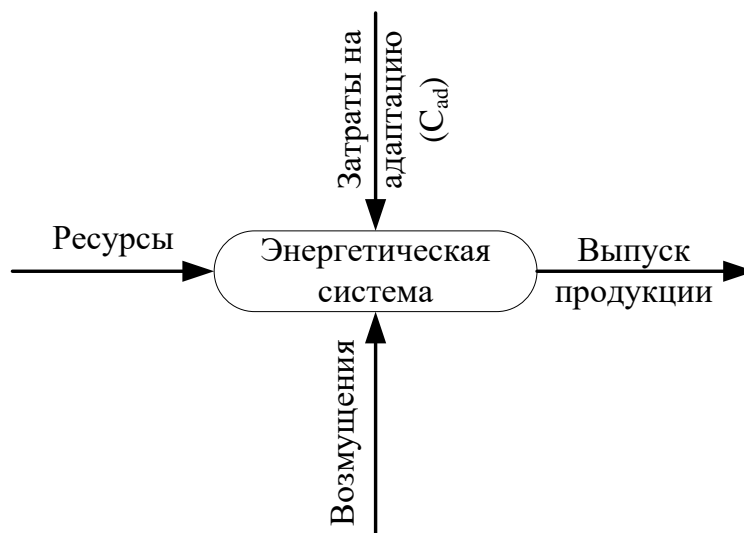


Рисунок 2.3 – Свойство адаптации по В.А. Смирнову

Источник: [175]

Уровень адаптивности системы В. А. Смирнов оценивал с помощью следующей формулы:

$$Ad = \frac{C_{ad}}{C_0} \quad (2.1)$$

где  $C_{ad}$  – затраты на адаптацию к заданному возмущению внешней среды;  
 $C_0$  – запланированные затраты, необходимые для выполнения поставленного плана по выпуску продукции.

Чем меньше показатель  $Ad$ , тем система адаптивнее.

В современных условиях целью существования хозяйственной системы является не точное выполнение плана по выпуску продукции, а достижение поставленных целей, которыми могут быть: максимизация прибыли

энергетических компаний; обеспечение экономического роста достаточным количеством энергетического ресурса; расширение энергетического потенциала страны, повышение качества жизни населения и др. При оценке адаптивности энергетических систем и вариантов их развития необходимо понимание того, к чему и для чего происходит адаптация.

Объем адаптационных затрат и тип адаптационных мероприятий, их структура, характер их распределения во времени (единовременные или осуществляемые несколькими этапами) зависят от природы стрессовой ситуации. В зависимости от природы возникновения стрессовые ситуации укрупненно могут быть объединены в следующие группы [92]:

- финансово-инвестиционные: повышение кредитных ставок, неблагоприятные валютные колебания, задержки в финансировании инвестиционных проектов, рост уровня инфляции, ухудшение условий доступа к рынкам капиталов, ухудшение финансового состояния инвесторов и др.;

- производственные: аварии, производственные остановки, изменения мировых потоков энергоресурсов, появление новых технологий добычи, переработки и транспортировки энергоресурсов и пр.;

- рыночные: резкие изменения уровня цен на различные виды энергоресурсов, объема спроса на энергоресурсы, условий международной торговли и пр.;

- социально-политические: усиление политической напряженности в отношениях между странами, ужесточение требований к уровню экологической безопасности энергетических объектов и пр.

В случае возникновения финансово-инвестиционных стрессовых ситуаций затраты на адаптацию могут быть связаны с ростом требуемых капиталовложений, затратами на реорганизацию, затратами на обслуживание кредитов и др. Стрессовые ситуации производственного характера могут привести как к единовременным затратам на устранение последствий аварий, так и к пролонгированным затратам на повышение производственной эффективности. Неблагоприятные изменения рыночной среды, как правило,

требуют пролонгированных затрат на разработку новой рыночной стратегии энергетических компаний и ее дальнейшую реализацию. Адаптация энергетических систем к стрессовым ситуациям социально-политического характера часто требует осуществления государственных расходов на реализацию новых крупномасштабных энергетических проектов, экономически малоэффективных, но целесообразных с точки зрения новых условий функционирования.

Вариант развития энергетических систем, допускающий большие неблагоприятные изменения условий, которые могут быть нивелированы меньшими затратами, является более адаптивным. Однако показатель адаптивности варианта развития энергетических систем, являясь важным критерием оценки и отбора альтернативных вариантов, не является единственным критерием. Низкий уровень адаптивности варианта развития энергетических систем не является достаточным условием для его отклонения, поскольку если вариант обеспечивает достаточное количество энергоресурса и соответствующую инфраструктуру для оптимистического варианта экономического развития страны, он может быть принят к реализации.

Некоторые авторы в качестве основной характеристики уровня адаптивности называют не объем затрат на адаптацию, а время, требуемое для восстановления системы после стрессового события [322]. На рис. 2.4 отображен процесс восстановления эффективности работы системы после стрессового события. Величина  $\Delta t = (t_1 - t_0)$  определяет уровень адаптивности системы к рассматриваемому виду стрессовых ситуаций. Чем короче период времени, требуемого для восстановления эффективности функционирования системы, тем она более адаптивна.

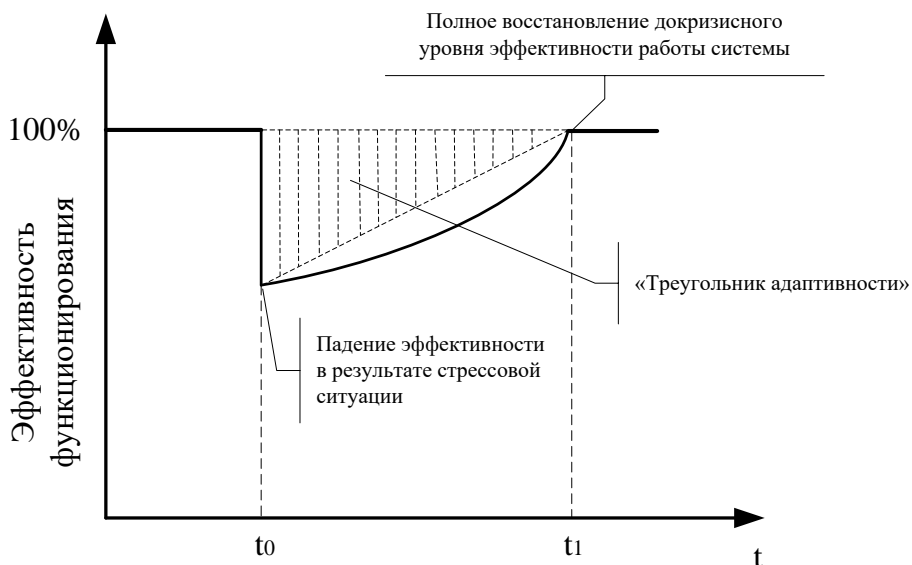


Рисунок 2.4 – Динамика равномерного восстановления системы

Источник: составлено автором по [307]

Объединяя оба критерия – степень чувствительности системы к стрессу и время, требуемое на ее восстановление, – уровень адаптивности энергетической системы может быть описан площадью «треугольника адаптивности». Площадь треугольника зависит от размера падения эффективности функционирования системы при реализации данного стрессового события и от продолжительности времени, требуемого для восстановления системы. Таким образом, чем меньше площадь треугольника тем, при прочих равных условиях, система более адаптивна. Соответственно, для повышения адаптивности системы усилия должны быть направлены на снижение возможных негативных последствий реализации тех или иных угроз, а также создание такой структуры, при которой система могла бы максимально быстро восстанавливать свою эффективность после наступления неблагоприятного события.

При анализе уровня адаптивности системы «треугольник адаптивности» может учитывать неравномерность процесса падения и восстановления эффективности системы (рис. 2.5).



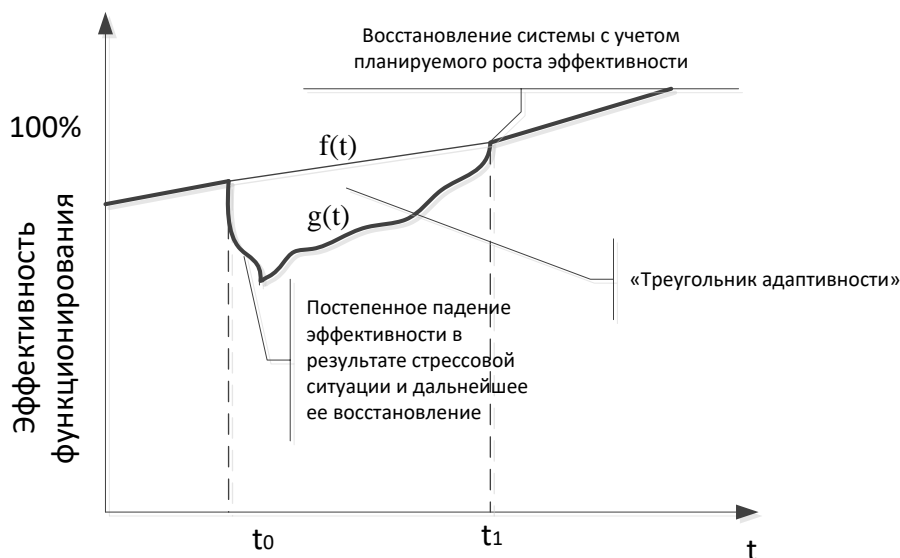


Рисунок 2.5 – Площадь «треугольника адаптивности» при неравномерном процессе восстановления эффективности функционирования системы

Источник: составлено автором по [322]

При неравномерном процессе восстановления эффективности размер «треугольника адаптивности» находится следующим образом:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} (f(t) - g(t)) dt \quad (2.2)$$

Время восстановления системы как характеристика адаптивности энергетических систем может быть использовано для оценки реакции системы на краткосрочные стрессовые ситуации – например, нарушения в производственном процессе, где время восстановления системы исчисляется часами. Однако в отношении реализации стратегических угроз национальной энергетической системы данная характеристика адаптивности мало информативна, поскольку реакция системы на реализацию угрозы имеет долгосрочный характер, а характеристика эффективности системы в долгосрочной перспективе не столь очевидна, так как со временем меняются не только характеристики работы системы, но и социально-экономические условия, в контексте которых оценивается эффективность.

В научной литературе не отражен тот факт, что адаптивность энергетических систем может быть статической и динамической. Статическая адаптивность описана выше как способность системы за приемлемый промежуток времени возвратиться к докризисному уровню экономической эффективности, производительности или другому параметру. Однако, принимая во внимание то, что энергетические системы являются открытыми системами, которые активно развиваются в меняющихся условиях функционирования, особое внимание при оценке уровня адаптивности энергетических систем следует уделять динамической адаптивности (адаптивности развития). Динамическая адаптивность (адаптивность развития) представляет собой адаптивность варианта развития энергетической системы, то есть способность системы обеспечивать изменение своих элементов в процессе собственного развития в соответствии с динамикой экономического развития. Большой адаптивностью обладает тот вариант развития энергетической системы, который с меньшими временными и финансовыми затратами нивелирует негативные изменения среды с сохранением целевых показателей развития энергетической системы. В отличие от статической адаптивности, где энергетическая система рассматривается в контексте возврата к первоначальному равновесному состоянию, свойство динамической адаптивности дает системе возможность находить новые равновесные состояния в процессе своего развития.

Таким образом, свойство статической адаптивности энергетических систем представляет интерес при анализе безопасности и надежности их функционирования в краткосрочном периоде в условиях возникающих краткосрочных стрессовых ситуаций. Когда же рассматриваются вопросы, касающиеся соответствия развития ТЭК страны развитию экономики, последствий реализации стратегических угроз энергетической безопасности, разработки вариантов долгосрочного развития национальной энергетической системы, на первый план выходит динамическая адаптивность энергетических систем. Различие статической и динамической адаптивности необходимо

учитывать при выборе методов оценки текущего состояния и разработке стратегических планов развития энергетических систем.

Академик А. А. Макаров предлагает следующий количественный показатель устойчивости сценариев развития энергетических систем России. Под устойчивостью он понимает «способность системы сохранять свою структуру и траекторию развития при внешних и внутренних воздействиях» [172, с. 113].

$$\delta G_{kt} = \frac{G_{kt} - G_{t0}}{G_{t0}} \quad (2.3)$$

где:  $G_{kt}$ ,  $G_{t0}$  – объемы ВВП России в  $t$ -м периоде при целевом сценарии и риск-сценарии  $k$  соответственно.

Для оценки устойчивости сценария на весь прогнозируемый период предлагается суммировать значения показателей, рассчитанных для каждого периода с учетом дисконтирования:

$$\delta G_k = \frac{\sum_{t=0}^T \delta G_{kt}}{(1+r)^t} \quad (2.4)$$

где:  $r$  – ставка дисконтирования.

Предлагаемый показатель показывает, насколько отклонится фактический объем ВВП от объема ВВП, принятого в сценарии, за счет реализации той или иной угрозы.

Свойство статической адаптивности обуславливает статическое равновесие энергетической системы, под которым подразумевается такое состояние системы, при котором производственный потенциал энергетики обеспечивает в полной мере потребности в энергетических ресурсах экономики страны. Свойство динамической адаптивности обуславливает динамическое равновесие энергетической системы, под которым подразумевается такое состояние системы, при котором динамика развития энергетики соответствует динамике общественно-экономического развития, обеспечивая тем самым

энергетическую безопасность страны. Иллюстрация свойства динамической адаптивности энергетической системы приведены на рисунке 2.6.

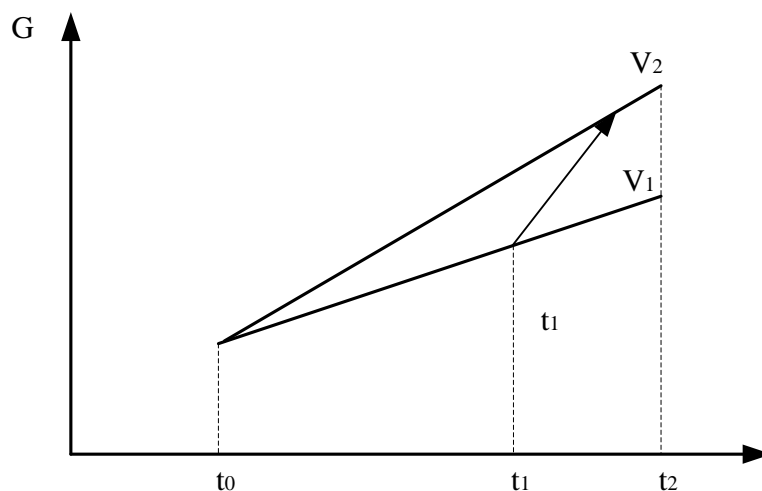


Рисунок 2.6 – Варианты развития энергетической системы

Источник: составлено автором

На рисунке 2.6 изображены два варианта развития энергетической системы, отличающиеся динамикой роста суммарной генерирующей мощности всех электростанций ( $G$ ) за рассматриваемый период времени  $[t_0; t_2]$ . Вариант  $V_2$  предполагает больший прирост генерирующих мощностей, чем вариант  $V_1$ . Выбор того или иного варианта зависит от прогноза развития экономики. В случае принятия прогноза развития экономики с меньшими показателями роста, выбирается вариант развития энергетики  $V_1$ . Однако с течением времени может быть выявлено, что рост генерирующих мощностей по варианту  $V_1$  не достаточен для обеспечения растущих потребностей экономики в энергоресурсе. Тогда в некоторый момент  $t_1$  должны быть сделаны дополнительные затраты в развитие энергетической системы с целью изменить траекторию развития с  $V_1$  на  $V_2$ . Чем с меньшими затратами, в том числе и временными, это можно осуществить, тем более адаптивна энергетическая система.

Переход энергетической системы с одной траектории развития на другую может требовать дополнительных капиталовложений, объем которых среди

прочего может зависеть от требуемого срока перехода с одной траектории на другую. На рис. 2.7 отображено увеличение требуемых капиталовложений на адаптацию развития энергетической системы ( $I_2 - I_1$ ), при этом данная адаптация потребует дополнительного времени ( $t_3 - t_2$ ).

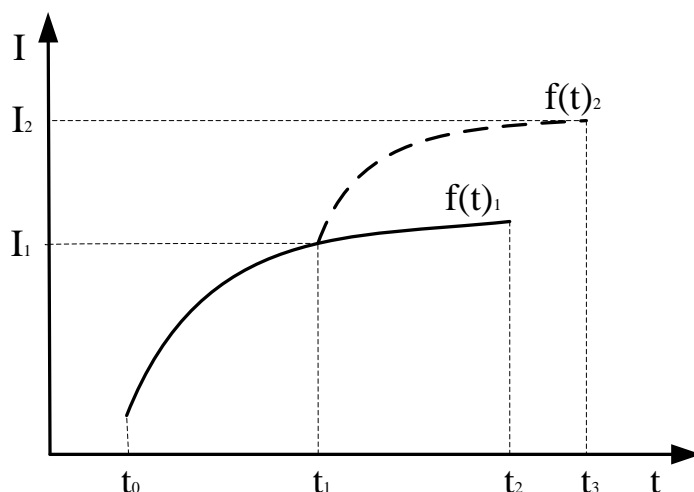


Рисунок 2.7 – Изменение затрат на развитие энергетической системы в результате неблагоприятных изменений условий функционирования

Источник: составлено автором

Однако в случае необходимости и при определенных условиях планируемые сроки ввода в эксплуатацию генерирующих мощностей могут быть соблюдены за счет дополнительного увеличения финансовых затрат на адаптацию (рис. 2.8). В этом случае траектория развития с  $f(t)_1$  переходит в траекторию  $f(t)_2$  с дополнительными капитальными затратами ( $I_3 - I_1$ ).

На основе анализа имеющейся научной литературы, посвященной проблемам раскрытия свойств адаптивности сложных систем разной природы, можно предложить следующее определение адаптивности. Адаптивность – это способность сложных систем в целях обеспечения их стабильного функционирования приспосабливаться к неблагоприятным изменениям внешней и внутренней среды как за счет использования внутренних резервов, так и за счет привлечения внешних ресурсов.

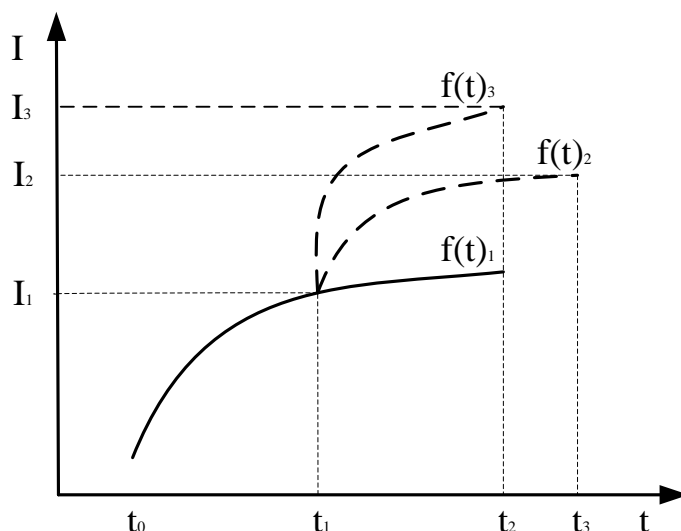


Рисунок 2.8 – Варианты изменения объема вложенных средств во времени при осуществлении адаптационных мероприятий

Источник: составлено автором

Учет свойства адаптивности энергетических систем при стратегическом планировании развития ТЭК, а также в целях обеспечения энергетической безопасности позволит повысить уровень эффективности функционирования энергетических систем. Адаптивность в той или иной степени присуща всем энергетическим системам, однако уровни их адаптивности различны. Факторы, определяющие уровень адаптивности энергетических систем, будут рассмотрены ниже. Здесь же отметим, что чем выше рассматриваемый иерархический уровень энергетической системы, тем сложнее и дороже адаптационные мероприятия к изменяющимся условиям. Данное обстоятельство объясняется тем, что чем выше уровень организации энергетической системы, тем более она инерционна, то есть требует больших финансовых, временных и трудовых затрат на изменение параметров ее функционирования.

## **2.2. Роль адаптивности энергетических систем в обеспечении энергетической безопасности**

Поскольку процесс обеспечения энергетической безопасности связан с принятием решений в условиях высокой неопределенности, он имеет сходство с процессом стратегического управления рисками, который состоит из следующих этапов: распознавание рисков, оценка вероятности их реализации, оценка последствий реализации выделенных рисков; выбор метода воздействия на риск; выработка конкретных мероприятий по управлению риском и их реализация.

Выбор метода воздействия на риск подразумевает выбор из следующих вариантов:

- принятие риска. Осуществляется в случае, если рискованная ситуация маловероятна, а ее последствия не имеют катастрофического характера. В таком случае фиксируется наличие данного риска, контролируется динамика его развития, но конкретные управленческие и организационные меры не принимаются;

- снижение риска. Данный метод подразумевает, что активность субъекта управления рисками направлена не на изменение системы, а на изменение среды ее функционирования для обеспечения более надежной и безопасной работы самой системы;

- снижение последствий реализации рискованной ситуации. В данном случае объектом воздействия выступает сама система. Воздействие на систему осуществляется с целью изменения ее отдельных элементов или структуры ее межэлементных связей для снижения чувствительности системы к реализации рискованных ситуаций.

В отношении больших систем энергетики основным методом воздействия на стратегические риски энергетической безопасности в большинстве случаев является развитие самих систем с целью снижения последствий реализации рискованных ситуаций. Данное обстоятельство объясняется тем, что воздействие на среду функционирования больших систем энергетики представляется крайне

сложной задачей, поскольку среда функционирования национальной энергетической системы фактически охватывает все аспекты жизни современного общества, включая вызванные научно-техническим прогрессом изменения в мировой экономике и энергетике, конкуренцию на международных энергетических рынках и геополитическую активность стран.

Изменения энергетической системы, направленные на повышение ее стрессоустойчивости, затрагивают ее адаптивные свойства. То есть основным способом снижения последствий реализации стратегических угроз энергетической безопасности страны является повышение адаптивных свойств национальной энергетической системы.

Уровень адаптивности энергетической системы может увеличиваться или уменьшаться в результате принимаемых управленческих решений. Поэтому адаптивность представляет собой характеристику, которая, с одной стороны, должна использоваться как один из критериев выбора стратегии развития энергетики, с другой – характеристику, на увеличение которой должны быть направлены управленческие усилия в рамках решения проблем обеспечения энергетической безопасности. Оценка текущего уровня адаптивности и анализ адаптивных свойств энергетической системы являются элементом процесса управления адаптивностью энергетических систем, необходимым для:

1. Оценки текущих рисков функционирования энергетической системы. Бенефициарами анализа в данном случае являются руководители энергетических компаний, нуждающиеся в объективной оценке операционных рисков; крупные потребители энергии, заинтересованные в определении рискованности и надежности поставок энергетических ресурсов в целях принятия управленческих решений; представители государственной власти, занятые разработкой и реализацией энергетической и экономической политики.

2. Выработки комплекса стратегических мероприятий по развитию энергетической системы. Энергетические системы обладают высокой инерционностью своего развития, что подразумевает необходимость продолжительного времени и больших финансовых вложений для



осуществления структурных изменений их параметров. Поэтому для принятия стратегических решений, касающихся долгосрочного развития энергетической системы и направленных на обеспечение энергетической безопасности, необходим анализ долгосрочных трендов и условий ее функционирования.

Оценка текущего уровня адаптивности энергетической системы (или, иными словами, ее статической адаптивности) является первым этапом процесса управления адаптивностью энергетической системы (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Процесс управления адаптивностью энергетической системы

Источник: составлено автором

Процесс управления адаптивностью энергетической системы может быть использован как инструмент повышения эффективности и надежности ее функционирования, а также для решения задачи обеспечения долгосрочной энергетической безопасности (рис. 2.10). Необходимость решения задачи обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны ведет к необходимости повышения качества стратегического планирования развития

национальной энергетической системы, которое должно приводить к росту эффективности функционирования национальной энергетической системы, что в свою очередь требует увеличения адаптивных свойств энергетики.



Рисунок 2.10 – Связь между рядом задач стратегического планирования развития ТЭК страны

Источник: составлено автором

Рост уровня адаптивности национальной энергетической системы происходит в долгосрочной перспективе, поэтому может сложиться ситуация, когда в процессе управления энергетической системой большее внимание будет уделяться краткосрочным задачам повышения экономической эффективности энергетики. Ориентированность на краткосрочные задачи повышения экономической эффективности нефтегазового комплекса может привести к росту доходов энергетических компаний и государства в среднесрочной перспективе, однако в долгосрочной перспективе могут возрасти риски реализации угроз энергетической безопасности страны. Например, если государство будет стимулировать развитие добычи и переработки относительно дешевых видов энергетических ресурсов (природного газа и нефти) и упускать из виду развитие альтернативных источников энергии и новых энергосберегающих технологий, растущий дисбаланс между потребляемыми

видами энергетических ресурсов может угрожать энергетической безопасности страны.

Управление адаптивностью энергетических систем должно осуществляться как на локальном уровне (уровне отдельных компаний энергетической отрасли), так и на глобальном уровне (уровне энергетической системы страны). Соответственно, решения, нацеленные на повышение уровня адаптивности энергетических систем, должны приниматься как руководителями энергетических компаний, так и государством. Решения руководства компаний о развитии подконтрольных им энергетических систем повышают их адаптивность с целью обеспечения устойчивости бизнеса компании и роста доходности. То есть основная цель повышения адаптивности энергетических систем компаниями заключается в снижении экономических рисков и стабилизации генерируемого дохода. Государство, вырабатывая стратегические планы по развитию национальной энергетической системы, нацелено на повышение эффективности функционирования энергетики и национальной экономики в сочетании с повышением уровня энергетической безопасности. Таким образом, субъектом, принимающим управленческие решения относительно увеличения адаптивности национальной энергетической системы в контексте решения проблем обеспечения энергетической безопасности страны, является государство. В табл. 2.3 систематизированы различия в целях и инструментах управления адаптивностью энергетических систем между государством и энергетическими компаниями.

Таблица 2.3 – Цели и инструменты управления адаптивностью энергетических систем, используемые государством и энергетическими компаниями

Энергетические компании	Государство
Цель увеличения уровня адаптивности энергетических систем	
Снижение экономических рисков функционирования компании.	Увеличение эффективности экономики и энергетики страны, повышение уровня энергетической безопасности.
Инструменты увеличения адаптивности энергетической системы	
Реализация инвестиционных проектов, увеличивающих уровень адаптивности	Субсидирование, льготное кредитование, льготное налогообложение и др.

энергетических систем; разработка и непосредственное внедрение организационных мер, повышающих адаптивность компании в целом; принятие решений о размерах финансовых и производственных резервов и пр.	
Приоритетный период	
Краткосрочный и среднесрочный периоды	Долгосрочный период
Основные риски, на снижение которых направлен процесс управления адаптивностью	
Риск снижения конкурентоспособности; риск аварий и производственных остановок; изменение структуры спроса на энергетические ресурсы и др.	Риск крупных аварий; риск значительного повышения цен на энергоносители; риск появления дефицита генерирующих мощностей и др.

Источник: составлено автором

Управление адаптивностью наряду с процессом управления рисками функционирования энергетических систем является одним из эффективных инструментов решения проблем обеспечения энергетической безопасности страны. Процесс принятия текущих и стратегических управленческих решений, направленных на повышение адаптивности национальной энергетической системы, базируется на анализе имеющихся текущих (текущие цены, затраты, технологии и пр.) и прогнозных (прогноз ценовой динамики, динамики спроса и предложения, валютных курсов, инфляции и т.д.) исходных данных.

В настоящее время как отечественная, так и мировая энергетика функционируют в условиях высокой неопределенности и волатильности основных технико-экономических показателей за счет высоких темпов научно-технического развития, увеличения доли возобновляемых источников энергии в топливно-энергетических балансах развитых стран, продолжающейся глобализации энергетических рынков, международной социально-политической нестабильности, роста требований к экологической безопасности энергетических объектов и пр. Неопределенность исходных данных напрямую влияет на процесс управления энергетическими системами. В этих условиях вопрос о качестве прогнозов развития энергетики, энергетических рынков, мировой и региональной экономики, встает особенно остро.

Поскольку энергетические системы и их элементы представляют собой сложные технические объекты, требующие значительных временных и

финансовых затрат на свое создание, и эксплуатируемые на протяжении десятилетий (сущность и особенности энергетических систем хорошо рассмотрены в [18, 34, 71, 126, 137, 200, 292]), планирование и осуществление развития энергетических систем требует долгосрочного прогнозирования динамики мировой экономики, экономики страны и регионов, отдельных энергетических и сырьевых рынков, научно-технического прогресса и пр. Прогнозы изменения такого большого числа сложных переменных заведомо являются данными, имеющими ту или иную степень достоверности. Уровень достоверности исходных данных определяется многими факторами: от качества моделей, используемых для их получения, до характеристик анализируемых систем.

Энергетические системы являются сильно инерционными системами, медленно подстраивающимися под изменения условий их функционирования [38, 70, 73]. Поэтому руководство энергетических компаний и правительство страны должно опираться на достоверные данные для принятия управленческих решений, касающихся вариантов развития энергетических систем. Высокий уровень достоверности исходных данных является критически важным условием принятия эффективных управленческих решений. Решения, принятые с использованием правильных методов и процедур, но основанные на некачественной информации, будут неэффективными. В связи с этим встает вопрос об уровне допустимой погрешности исходных данных, используемых при принятии стратегических управленческих решений в задачах обеспечения долгосрочной энергетической безопасности.

Проблемами принятия управленческих решений в условиях неопределенности исходных данных как в экономике в целом, так и в энергетике в частности занимались и занимаются многие ученые. Так, например, в энергетике проблема неопределенности исходных данных рассматривается в контексте оценки экономической эффективности крупномасштабных инвестиционных проектов [25, 28, 49, 62, 63, 69, 124], в рамках управления энергетическими системами [48, 66, 152, 306], оценки

энергетической безопасности страны [23, 24, 32, 35, 53, 77, 224, 334], оценки необходимых уровней резервов для обеспечения бесперебойного производственного процесса [72, 89, 174] и др. Анализ процессов принятия управленческих решений в энергетике и моделирования развития энергетических систем помог выявить следующие факторы, напрямую влияющие на уровень допустимой погрешности основных исходных данных.

Первым фактором, актуальным для энергетических систем любого уровня организации, является горизонт прогнозирования. Горизонт прогнозирования охватывает промежуток времени от настоящего в будущее, в котором планируется реализация того или иного управленческого решения (решения об инвестировании в тот или иной проект, о реорганизации производства, о наращивании производства), и на который необходимо осуществить прогноз основных исходных данных. Чем более длительным является горизонт прогнозирования, тем неизбежнее по объективным причинам будет снижение уровня достоверности данных (рис. 2.11). В то же время требование к точности значений отдаленных во времени показателей также снижается, поскольку чем больше горизонт прогнозирования, тем выше уровень допустимой погрешности. Данный фактор особенно актуален для энергетических систем, где горизонт прогнозирования может составлять 20-25 лет.

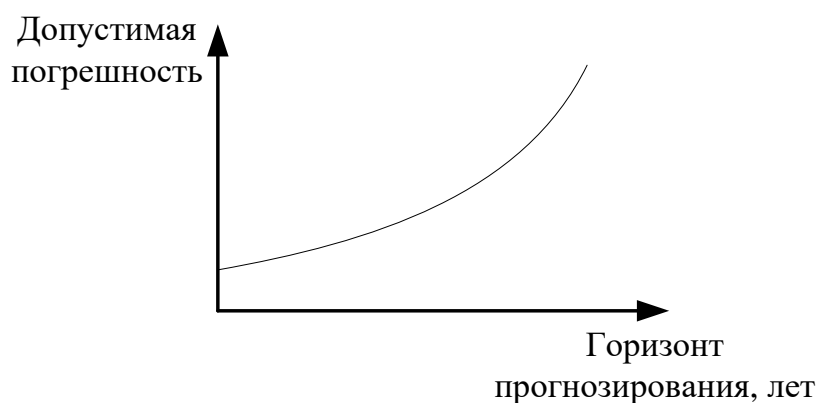


Рисунок 2.11 – Зависимость уровня допустимой погрешности исходных данных от горизонта прогнозирования

Источник: составлено автором

Проиллюстрировать данное утверждение можно на примере дисконтирования денежного потока, в котором видно, что влияние ошибки исходных данных, относящихся к отдаленной перспективе, на принятие текущего управленческого решения сильно снижается (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Анализ условного денежного потока

Год, n	Дисконт $(1/(1+r)^n)$ при ставке дисконтирования (r) 15%	Дисконтированный денежный поток текущего года, млн руб.	Суммарный дисконтированный денежный поток, млн руб.	Доля текущего года в итоговой величине дисконтированного денежного потока, %
1	0,870	869,57	869,57	13,89
2	0,756	756,14	1625,71	12,08
3	0,658	657,52	2283,23	10,50
4	0,572	571,75	2854,98	9,13
5	0,497	497,18	3352,16	7,94
6	0,432	432,33	3784,48	6,91
7	0,376	375,94	4160,42	6,01
8	0,327	326,90	4487,32	5,22
9	0,284	284,26	4771,58	4,54
10	0,247	247,18	5018,77	3,95
11	0,215	214,94	5233,71	3,43
12	0,187	186,91	5420,62	2,99
13	0,163	162,53	5583,15	2,60
14	0,141	141,33	5724,48	2,26
15	0,123	122,89	5847,37	1,96
16	0,107	106,86	5954,23	1,71
17	0,093	92,93	6047,16	1,48
18	0,081	80,81	6127,97	1,29
19	0,070	70,27	6198,23	1,12
20	0,061	61,10	6259,33	0,98

Источник: составлено автором

Как видно из табл. 2.4, первые 5 лет формируют 54% суммарного дисконтированного аннуитетного денежного потока при ставке дисконтирования 15%. Поэтому для получения достоверных данных по вариантам развития энергетических систем в краткосрочной перспективе необходимо использовать высокоточные, дезагрегированные модели прогнозирования изменения релевантных технико-экономических показателей. На долгосрочную и среднесрочную перспективу могут использоваться

агрегированные модели, экспертные оценки, а также прогнозы, основанные на анализе долгосрочных трендов.

Вторым фактором, определяющим степень допустимой погрешности основных исходных данных, является уровень адаптивности энергетической системы: чем выше уровень адаптивности системы, тем больший уровень погрешности допустим при выборе варианта ее развития. Адаптивная система в состоянии «подстроиться» к ошибкам исходных данных, не снижая своей эффективности.

Третьим фактором, определяющим уровень допустимой погрешности основных исходных данных, является экономическая эффективность функционирования энергетической системы и отдельных ее элементов. Чем эффективнее система, тем при прочих равных она менее чувствительна к ошибкам прогнозных данных, поскольку имеет некоторый запас прочности. Ухудшение фактических условий функционирования системы будет приводить к снижению значений показателей эффективности. Степень ухудшения фактических условий будет тем выше, чем выше текущая эффективность функционирования энергетической системы.

Однако уровень допустимой погрешности обуславливается не только величиной превышения значения показателя эффективности состояния системы над критическим его значением (например, в случае если таким итоговым показателем является  $NPV$ , то его значение больше 0), но и уровнем, при котором будет выбран альтернативный вариант развития энергетической системы. На рис. 2.12 приводится пример критических уровней значений исходных данных. Цена на энергоресурс прогнозируется в границах  $P_1$  и  $P_2$ . Для этих исходных данных выбирается вариант развития энергетической системы, эффективность которого описывается прямой  $V_1$ . Однако если верхняя граница прогнозируемой цены достигнет уровня  $P_{max}$ , может быть выбран вариант развития энергетической системы  $V_2$ , характеризующийся выходом на другие рынки сбыта, строительством других технологических установок (строительство ТЭЦ вместо ТЭС), изменением установочной мощности



энергетических объектов и др. В связи с этим можно говорить о том, что интервал  $[P_1; P_{max}]$  является границей допустимой погрешности, так как при попадании в данный интервал фактической цены на энергоресурс будет поддержан вариант  $V_1$ . Аналогичная ситуация может быть в случае снижения фактической цены ниже прогнозируемого уровня  $P_1$ .

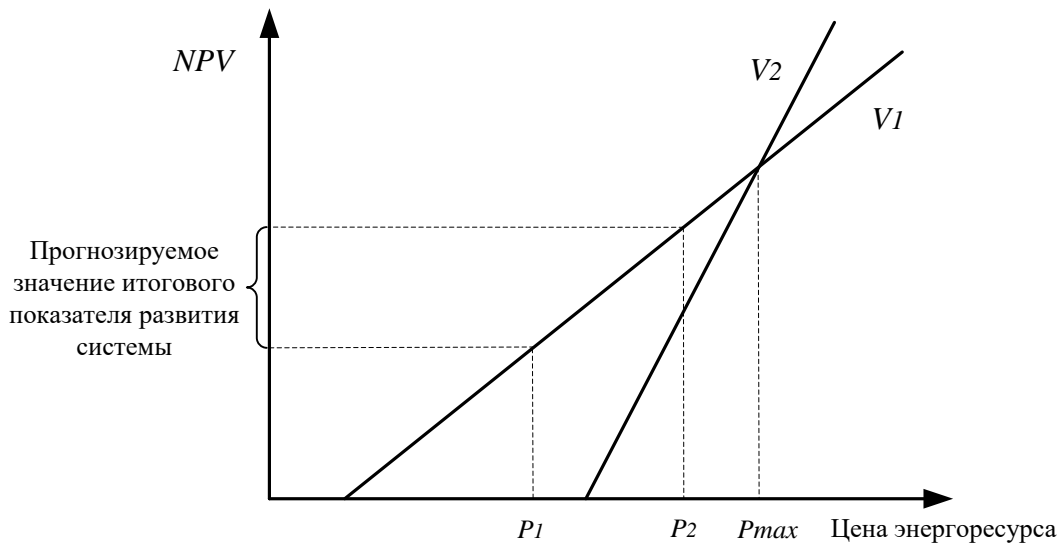


Рисунок 2.12 – Критические уровни значений исходных данных

Источник: составлено автором

Таким образом, уровень допустимой погрешности определяется не только эффективностью варианта развития энергетической системы, но и уровнем основных технико-экономических показателей, при которых выбирается альтернативный вариант развития.

Четвертым фактором, влияющим на уровень допустимой погрешности основных исходных данных, является состав решаемых задач. Состав решаемых задач определяет влияние точности исходных данных на принимаемое управленческое решение. Решаемые задачи могут быть:

- текущего значения;
- тактического значения;
- стратегического значения.

Задачи текущего значения – это задачи, решаемые в процессе текущего управления энергетическими системами, требующие максимально полной и точной информации о состоянии системы и условий ее функционирования.

К задачам тактического значения относятся задачи среднесрочного горизонта прогнозирования, решение которых касается развития энергетической системы в текущей траектории ее развития: расширение или уменьшение объемов производства, наращивание производственного потенциала, строительство новых промышленных площадок, заключение договоров на поставки энергоресурсов и т.д.

Задачи стратегического значения охватывают задачи, решение которых относится к области долгосрочной траектории развития всей энергетической системы: развитие возобновляемых источников энергии; выход на новые рынки сбыта; выбор способа транспортировки углеводородов; реализация крупномасштабных инвестиционных проектов по запуску новых месторождений и т.д. При решении стратегических задач едва ли можно говорить о наличии достоверных исходных данных, поскольку эти данные касаются не только и не столько текущего и среднесрочного развития ситуации, сколько долгосрочных прогнозов развития мировой и национальной экономики, социально-политических изменений, научно-технического прогресса в сфере добычи, переработки и транспортировки энергоресурсов и т. д. Поэтому для решения стратегических задач иногда используют не только данные, полученные с помощью сложных, проверенных и хорошо отлаженных моделей, но и экспертные оценки.

Рассмотрев факторы, влияющие на уровень допустимой погрешности, можно сделать вывод о том, что величина допустимой погрешности исходных данных тем выше, чем меньше она влияет на вывод о результате реализации варианта развития энергетической системы, а значит и на принятие управленческого решения, а процесс управления адаптивностью энергетических систем в рамках решения проблем обеспечения энергетической безопасности в зависимости от рассматриваемого горизонта имеет разные

требования к точности имеющейся информации и форме принимаемых решений. В условиях управления статической адаптивностью, когда управленческие решения относятся к строительству или модернизации конкретных элементов системы и требуется детальный технико-экономический анализ работы энергетической системы, допустимая погрешность должна быть минимальной. В то же время процесс управления динамической адаптивностью, в котором принимаемые управленческие решения направлены на создание институциональной среды, способствующей развитию национальной энергетической системы в направлении, обеспечивающем наибольший уровень ее адаптивных свойств, затрагивая области с высокой неопределенностью исходных данных, допускает их большую погрешность.

### **2.3. Факторы, определяющие уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях**

Оценка текущего уровня адаптивности энергетических систем, а также процесс стратегического планирования развития национальной энергетической системы в целях решения проблем обеспечения энергетической безопасности страны требуют знание факторов, определяющих уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях. Анализ исследовательских работ С. Аракавы [206], Г. Н. Антонова [9], Л. А. Мелентьева [125, 126], Ю. Д. Кононова [71], В. А. Смирнова [174, 175], Т. Берглунда [213], П. Цвайфела [363], опубликованных с 1970-х по 1990-е гг., показал, что основными факторами и критериями, определяющими адаптивность энергетических систем, были:

- наличие резервов углеводородов или (в случае стран-импортеров) стабильные поставки углеводородов из стран-экспортеров;
- наличие резервов мощностей, которые могли быть использованы в случае резкого роста внутреннего спроса на энергетические ресурсы;
- характер государственной поддержки национальных топливно-энергетических комплексов;

– уровень развития сопряженных отраслей, обеспечивающих материальными ресурсами ТЭК страны;

– наличие крупных электростанций для обеспечения положительного эффекта масштаба, когда затраты на установку одного КВт мощности электростанции снижаются с увеличением ее установленной мощности.

Систематизируя факторы определяющие уровень адаптивности энергетических систем, В. А. Смирнов выделял следующие три группы [175]:

1. Факторы, влияющие на создание резервов и излишков при функционировании и развитии энергетических систем. При наличии резервов эти ресурсы могут быть использованы на погашение возмущающего воздействия на систему.

2. Факторы, определяющие структурную гибкость системы: соотношение постоянных и переменных затрат; соотношение затрат на инфраструктуру и затраты в целом на развитие или создание энергетической системы; доля затрат на создание наиболее инерционных элементов системы и др.

3. Факторы, относящиеся к характеру распределения во времени затрат на создание или развитие энергетической системы. Так, например, чем позднее по времени осуществляются основные затраты на формирование энергетической системы, тем благоприятнее с позиции адаптации.

Таким образом, адаптивность энергетических систем ранее базировалась на наличии больших резервов как производственных мощностей, так и энергетических ресурсов.

Анализ исследований, посвященных проблемам обеспечения адаптивности энергетических систем на современном этапе развития [160, 180, 186, 219, 223, 234, 252, 255, 262], показал, что фундаментальные изменения, происходящие в мировой энергетике (развитие технологий добычи, преобразования и транспортировки энергетических ресурсов, произошедшая в 1990-х и 2000-х гг. во многих странах мира либерализация рынков электроэнергии, внедрение и широкое распространение малой генерации, процесс дальнейшей интеграции

национальных энергетических систем в мировую энергетику, а также рост политической напряженности), оказывают значительное влияние на факторы, определяющие адаптивность современных энергетических систем. В настоящее время в связи с произошедшими изменениями условий функционирования энергетических систем производственные и ресурсные резервы, оставаясь значимыми для обеспечения надежности функционирования энергетических систем, утратили свою роль в обеспечении их адаптивности. На первый план в повышении адаптивности энергетических систем все больше выходят факторы, ассоциируемые с устойчивой энергетикой:

- уровень диверсификации видов потребляемых энергетических ресурсов (нефть, газ, уголь, возобновляемые источники энергии – ВИЭ);
- уровень диверсификации структуры генерирующих мощностей по типу электростанций;
- уровень диверсификации поставщиков энергетических ресурсов;
- рост энергоэффективности производств и, как следствие, снижение энергоемкости экономики;
- развитие возобновляемых источников энергии;
- развитие технологий *Smart Grids* («Умные сети»);
- развитие распределенной генерации.

Все вышперечисленные факторы в той или иной степени влияют на стрессоустойчивость энергетических систем и на их адаптивность к меняющимся условиям за счет создания более гибкой структуры. Например, технология *Smart grids* на основе использования новых информационных технологий позволяет более эффективно передавать электроэнергию, быстрее восстанавливать электроснабжение после аварий, снижать затраты на электрогенерацию, создавать интегрированные энергетические системы ВИЭ, строить «умные дома» и т.д. Технологи *Smart grids* создают возможность появления «активных потребителей» на рынке электроэнергии. Активным потребителем электроэнергии является потребитель, самостоятельно

принимающий решения о режиме своего электропотребления и имеющий возможность реализовывать излишки генерируемой им электроэнергии. Появление активного потребителя как равноправного участника рынка электроэнергии способствует повышению уровня адаптивности энергосистемы, поскольку, увеличивая количество возможных вариантов реакции системы на происходящие изменения, дает возможность сглаживания пиковых нагрузок, снижения системного резерва, оптимизации режимов работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращению расходов и потерь. Многоагентные системы моделирования эффективно имитируют поведение активного потребителя и дают возможность оценить силу его воздействия на структуру и условия функционирования локальных электроэнергетических систем.

За счет обмена информацией между производителями и потребителями электроэнергии «Умные сети» позволяют автоматически перенаправлять нагрузку в сетях и, тем самым, сводить к минимуму последствия перебоев в подаче электроэнергии. Таким образом, данная технология, снижая значимость каждого отдельного элемента в работе электроэнергетической системы, позволяет ей более быстро и эффективно реагировать на изменяющиеся внешние условия [258, 278, 279, 349].

В ситуации высокой неопределенности и волатильности условий существования энергетической системы, важными становятся не только затраты на адаптацию, но и сам процесс принятия управленческого решения. В частности, чем быстрее осуществляется реакция на происходящие изменения, тем управляемая энергетическая система при прочих равных более адаптивна. И более того, чем больше вариантов допустимых реакций существует, тем более эффективным может быть выбор варианта реакции на происходящие изменения с точки зрения достижения целей развития энергетической системы. В связи с этим уровень адаптивности энергетической системы определяется не только количеством затрат на ее приспособление к внешним и внутренним изменениям, но также и количеством возможных, доступных и эффективных вариантов реакции системы на изменения: чем больше возможных, доступных

и экономически эффективных вариантов реакции системы на изменения существует, тем она более адаптивна при прочих равных условиях. В этой ситуации внедрение технологии Smart Grids также способствует повышению уровня адаптивности энергетических систем.

Приведенный перечень факторов, влияющих на уровень адаптивности современных энергетических систем, должен быть дополнен, по нашему мнению, таким фактором, как уровень развития финансовых рынков и степень доступа к ним компаний энергетического сектора. В случае высокой финансовой устойчивости дополнительные расходы на адаптацию могут быть погашены за счет собственных средств энергетических компаний. Однако чем выше уровень развития финансовых рынков, чем выше степень доступа к ним компаний энергетического сектора и чем больше инструментов финансового рынка им доступно, тем больше у них возможностей для финансирования дополнительных затрат на адаптацию энергетической системы.

Так как современные энергетические системы представляют собой сложные системы, состоящие из большого числа взаимосвязанных элементов, еще одним фактором, обеспечивающим адаптивность, является уровень организации взаимодействия между компаниями энергетического сектора и прочими участниками энергетического рынка. Чем лучше организована коммуникация между участниками, тем быстрее будет осуществлена согласованная реакция на изменяющиеся условия, и тем ниже будут затраты на адаптационные мероприятия при прочих равных условиях.

Приведенный выше перечень факторов, формирующих адаптивность энергетических систем, и критериев, позволяющих оценить уровень их адаптивности, автор предлагает систематизировать в соответствии с:

- их участием в формировании адаптивности основных структурных элементов энергетической системы, принадлежащих к разным стадиям процесса создания и потребления энергетического ресурса (табл. 2.5);
- горизонтом прогнозирования и уровнем организации энергетической системы.

Таблица 2.5 – Факторы, формирующие адаптивность структурных элементов энергетической системы, принадлежащих к разным стадиям процесса создания и потребления энергетического ресурса

Стадии процесса создания и потребления энергетического ресурса	Факторы, обеспечивающие адаптивность структурных элементов энергетической системы на определенной стадии процесса создания и потребления энергетического ресурса
Добыча энергетического ресурса	Наличие запасов ресурсов; развитие возобновляемых источников энергии; наличие передовых технологий добычи; себестоимость добычи; коммерческая и производственная эффективность компаний добывающего сектора и др.
Переработка энергетического ресурса и преобразование энергии	Уровень диверсификации поставщиков энергетических ресурсов; уровень диверсификации видов потребляемых энергетических ресурсов; запас производственных и электрогенерирующих мощностей; уровень диверсификации структуры генерирующих мощностей по типу электростанций; инвестиционная привлекательность компаний ТЭК; наличие конкуренции на энергетическом рынке и др.
Транспортировка / Передача и распределение	Наличие организованных рынков оптовой и розничной торговли энергетическими ресурсами; развитая транспортная сеть; низкие организационные и правовые барьеры для подключения новых производителей к электрическим сетям; развитие технологий <i>Smart Grids</i> ; развитие распределенной генерации и др.

Источник: составлено автором

Ранее было показано, что решения, принимаемые в процессе управления адаптивностью энергетических систем, зависят от горизонта прогнозирования их развития. Так в краткосрочной перспективе основными факторами риска, к которым должна адаптироваться энергетическая система, являются:

- спекулятивные колебания спроса и предложения на энергетических рынках;
- краткосрочные колебания ряда макроэкономических показателей (процентная ставка, курс валют, уровень инфляции и т.д.), способных повлиять на запланированное развитие энергетической системы;
- техногенные аварии, приводящие к резкому росту потребности в том или ином виде энергии на данной территории;
- социально-политические факторы.



В среднесрочной и долгосрочной перспективе уровень адаптивности энергетической системы будет определяться степенью ее адаптации к таким отклонениям как:

- долгосрочное ухудшение инвестиционного климата;
- устойчивые тренды снижения спроса на определенные энергоресурсы;
- изменение темпов экономического развития страны или региона;
- ужесточение требований к параметрам варианта развития энергетической системы (например, в контексте изменения норм экологической безопасности).

На рисунках 2.14–2.16 представлены наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы и факторы, обеспечивающие ее адаптивность, систематизированные в зависимости от горизонта прогнозирования и уровня организации системы (рис. 2.13).



Рисунок 2.13 – Уровни организации энергетических систем

Источник: составлено автором

Следует отметить, что выделенные на рисунках 2.14–2.16 факторы оказывают влияние на энергетические системы всегда, а не только в указанные горизонты прогнозирования и на указанных уровнях организации

энергетической системы. Однако большее воздействие на функционирование системы эти факторы оказывают именно на выделенных уровнях ее организации и на указанных горизонтах прогнозирования.

Горизонт прогнозирования	Наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы	Факторы, обеспечивающие адаптивность энергетической системы
Краткосрочный	Краткосрочные колебания спроса и цен на энергоресурс на конкретных энергетических рынках; аварии и остановки в производстве; изменения законодательства; задержка в финансировании инвестиционных проектов участниками	Производственные резервы, позволяющие энергетической системе компании покрыть скачок потребности в энергоресурсе
Среднесрочный	Устойчивый тренд изменения спроса и предложения на энергоресурс; колебание процентных ставок; рост инфляции	Инвестиционная привлекательность вложений в развитие энергетической системы; квалифицированный управленческий персонал; доля инерционных элементов в структуре энергетической системы
Долгосрочный	Изменение спроса и цены на энергоресурс, производимый энергетической системой; изменение структуры спроса на энергоресурсы со стороны экономики	

Рисунок 2.14 – Наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы на уровне отдельных компаний и факторы, обеспечивающие ее адаптивность, систематизированные в зависимости от горизонта прогнозирования

Источник: составлено автором

На краткосрочном горизонте прогнозирования развития энергетических систем отдельных компаний большую роль играют производственные резервы, за счет которых может быть покрыт краткосрочный дефицит энергоресурсов. Высокая инерционность энергетических систем не позволят в краткосрочной перспективе покрывать дефицит за счет наращивания производства.

Горизонт прогнозирования	Наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы	Факторы, обеспечивающие адаптивность энергетической системы
Краткосрочный	Краткосрочные колебания спроса и цен на энергоресурс, вызванные политическими, климатическими и иными флуктуациями	Сбалансированное развитие производственного потенциала на всех стадиях преобразования и передачи энергии; наличие производственных резервов на всех стадиях преобразования и передачи энергии
Среднесрочный	Устойчивый тренд изменения спроса и предложения на энергоресурс; колебание процентных ставок; снижение затрат на добычу, преобразование и передачу альтернативных для рассматриваемой энергетической системы видов энергоресурсов	Инвестиционная привлекательность отраслей энергетического хозяйства; грамотная политика государства, направленная на стимулирование развития энергетического производства; снижение затрат на добычу, переработку и передачу энергоресурса
Долгосрочный	Изменение спроса и цены на энергоресурс, производимый энергетической системой; изменение структуры спроса на энергоресурсы со стороны экономики	

Рисунок 2.15 – Наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы на уровне отраслей энергетики и факторы, обеспечивающие ее адаптивность, систематизированные в зависимости от горизонта прогнозирования

Источник: составлено автором

Уровень адаптивности энергетических систем отраслей энергетики, объединяющих все стадии преобразования и передачи энергии, во многом зависит от сбалансированного развития производственного потенциала всех стадий добычи, преобразования и передачи энергоресурсов.

Горизонт прогнозирования	Наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы	Факторы, обеспечивающие адаптивность энергетической системы
Краткосрочный	Краткосрочные колебания спроса и цен на энергоресурс, вызванные политическими, климатическими и иными флуктуациями	Сбалансированное развитие производственного потенциала на всех стадиях преобразования и передачи энергии; наличие производственных резервов на всех стадиях преобразования и передачи энергии
Среднесрочный	Системные экономические кризисы; появление новых технологий добычи, переработки и транспортировки энергоресурсов; изменение мировых потоков энергоресурсов; развитие альтернативных видов энергии; условия международной торговли; ужесточение требований к экологической безопасности	Улучшение инвестиционного климата; развитие смежных отраслей; государственная поддержка
Долгосрочный		

Рисунок 2.16 – Наиболее существенные факторы изменения условий функционирования энергетической системы на уровне ТЭК страны и регионов и факторы, обеспечивающие ее адаптивность, систематизированные в зависимости от горизонта прогнозирования

Источник: составлено автором

Выделение факторов, определяющих уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях, позволяет более эффективно проводить анализ влияния стрессовых ситуаций на функционирование энергетической системы в целом с целью разработки стратегических мероприятий, направленных на увеличение уровня ее адаптивности.

Из рисунков 2.14-2.16 видно, что одним из основных факторов обеспечения долгосрочной адаптивности энергетических систем любого уровня организации являются инвестиции, выступающие необходимым источником внешних ресурсов, без которых любая экономическая система будет деградировать, теряя свои адаптивные свойства. Без получения

дополнительных внешних ресурсов энергетическая система теряет свою производственную и экономическую эффективность, что сопровождается снижением уровня ее адаптивности. Данное обстоятельство обуславливается следующими факторами:

1. Физический износ, приводящий к снижению надежности энергетической системы.

2. Моральный износ, снижающий конкурентоспособность данной энергетической системы за счет опережающего технологического развития других энергетических систем.

3. Отставание развития энергетической системы от развития экономики региона или страны в целом.

4. Рост конкуренции на энергетическом рынке.

Рост конкуренции на энергетическом рынке на первоначальной стадии может снизить уровень адаптивности энергетической системы. Так, например, за период с 2003 г. по 2017 г. резко вырос объем мирового рынка сжиженного природного газа (с 130 млрд м<sup>3</sup> до 393 млрд м<sup>3</sup>), что сопровождалось ростом числа заводов по сжижению и терминалов по разжижению природного газа. Данное обстоятельство значительно снизило адаптивность газовых энергетических систем, основанных на передаче газа через сеть газопроводов, поскольку использование технологий сжижения природного газа (СПГ) усилило конкуренцию на международных газовых рынках и увеличило мобильность поставок газа в мире, что позволило как потребителям, так и производителям чутко реагировать на колебания спроса и предложения на различных региональных газовых рынках и перенаправлять потоки газа.

Энергетические компании, использующие для транспортировки энергоресурса только газопроводные сети, привязаны к определенным региональным рынкам и не могут в случае необходимости использовать арбитражные сделки. Однако в случае правильной модернизации системы в ответ на рост конкуренции уровень адаптивности может восстановиться или даже вырасти. На рис. 2.17 отображена схема успешной модернизации системы

в ответ на рост конкуренции на энергетическом рынке, приводящая к росту уровня ее адаптивности.



Рисунок 2.17 – Влияние роста конкуренции на энергетических рынках на уровень адаптивности системы

Источник: составлено автором

Наряду с естественными причинами негативное влияние на уровень адаптивности энергетической системы со временем могут оказывать социальные, политические и экономические факторы (политические запреты, ужесточение законодательства, снижение спроса на энергоресурсы, усиление конкуренции, рост общественного интереса к возобновляемым источникам энергии и т.п.).

Анализ изменений, происходящих в мировой энергетике и экономике, показал, что одним из способов обеспечения роста адаптивных свойств национальной энергетической системы и решения проблем обеспечения энергетической безопасности страны является становление в России устойчивой энергетики. Развитие производства энергии из возобновляемых источников, которое сопровождает переход к устойчивой энергетике, а также внедрение распределенной малой энергии, поможет российскому энергетическому сектору справиться с текущими проблемами ТЭК России

(низкая эффективность, моральное и физическое устаревание оборудования и т.д.) и повысить устойчивость и адаптивность российской энергосистемы.

Расширение использования возобновляемых источников энергии является ключевым элементом устойчивой энергетики. В отличие от европейских стран, которые стремятся диверсифицировать источники энергии, у России нет необходимости увеличивать долю возобновляемых источников энергии в своем энергетическом балансе. Несмотря на то, что развитие возобновляемой энергетики может оказать существенное положительное влияние на российскую экономику посредством создания новых рабочих мест, технологического развития и повышения конкурентоспособности ее энергетического рынка, можно утверждать, что у российского правительства нет существенных стимулов для ее развития.

В настоящее время для производства электроэнергии в России используется только три вида возобновляемых источников энергии – солнечная энергия, энергия ветра и малая гидроэнергетика, однако их роль в производстве электроэнергии слишком мала. Темпы ввода генерирующих мощностей, использующих данные источники энергии, отражены в правительственном документе, посвященном проблеме повышения энергоэффективности в электроэнергетике на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года (табл. 2.6).

Таблица 2.6 – Годовой ввод генерирующих мощностей согласно правительственным планам, МВт

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Итого
Солнечные электростанции	500	500	500	500	500	399	2 899
Ветряные электростанции	270	270	162,6	162,6	-	-	865,2
Малые гидроэлектростанции	49,8	16	24,9	33	23,8	41,8	210

Источник: [3]

В 2021 г. установленная мощность солнечных и ветряных электростанций составила 3616 МВт, что составило 1,47% от общей установленной мощности в Единой энергетической системе России. Выработка возобновляемой

электроэнергии составила 0,47% от общего объема выработки электроэнергии в России в 2021 г.

Быстро меняющиеся условия функционирования энергетических систем, появление новых технологий добычи, транспортировки и преобразования энергетических ресурсов, а также появление и распространение таких технологий, как Интернет вещей и создание цифровых двойников, приводят к появлению новых факторов, влияющих на адаптивность энергетических систем, и инструментов повышения их адаптивных свойств. Выявление, анализ и систематизация факторов, определяющих уровень адаптивности энергетических систем, является необходимым этапом процесса управления адаптивностью энергетических систем, позволяющим повышать обоснованность и эффективность государственной политики в области развития топливно-энергетического комплекса, решая тем самым проблемы обеспечения энергетической безопасности страны.

**Выводы по второй главе.** Во второй главе на основе анализа трудов отечественных и зарубежных ученых были показаны особенности проявления свойств гибкости, устойчивости и адаптивности сложных систем, раскрыта сущность свойства адаптивности энергетических систем и описаны основные характеристики адаптивности энергетических систем (объем затрат, необходимых для восстановления эффективного функционирования системы, и время восстановления системы). Сделан вывод о необходимости разделения понятий статической и динамической адаптивности. Статическая адаптивность описана как способность системы за приемлемый промежуток времени возвратиться к докризисному уровню экономической эффективности, производительности или другому параметру. Динамическая адаптивность (адаптивность развития) представляет собой адаптивность варианта развития энергетической системы, то есть способность системы обеспечивать изменение своих элементов в процессе собственного развития в соответствии с динамикой экономического развития. Показано, что в отличие от статической адаптивности, где энергетическая система рассматривается в контексте



возврата к первоначальному равновесному состоянию, свойство динамической адаптивности дает системе возможность находить новые равновесные состояния в процессе своего развития. Сделан вывод о том, что различие статической и динамической адаптивности необходимо учитывать при выборе методов оценки текущего состояния и разработке стратегических планов развития энергетических систем.

Проведя аналогию между процессом обеспечения энергетической безопасности и процессом стратегического управления рисками в условиях высокой неопределенности, было показано, что основным способом снижения последствий реализации стратегических угроз энергетической безопасности страны является повышение адаптивных свойств национальной энергетической системы.

Раскрыв сущность процесса управления адаптивностью энергетической системы, было показано, что данный процесс может быть использован как инструмент повышения эффективности и надежности ее функционирования, а также для решения задачи обеспечения долгосрочной энергетической безопасности. Были рассмотрены цели и инструменты управления адаптивностью энергетических систем, используемые государством и энергетическими компаниями.

Выявление особенностей процесса управления адаптивностью современных энергетических систем, связанных с использованием большого количества прогнозных данных относительно развития энергетики, энергетических рынков, мировой и региональной экономики, позволило обосновать актуальность задачи определения уровня допустимой погрешности исходных данных, используемых при принятии стратегических управленческих решений в целях обеспечения долгосрочной энергетической безопасности. Анализ процессов принятия управленческих решений в энергетике и моделирования развития энергетических систем помог выявить следующие факторы, напрямую влияющие на уровень допустимой погрешности основных исходных данных: величина горизонта прогнозирования, уровень адаптивности

энергетической системы, уровень экономической эффективности функционирования энергетической системы и отдельных ее элементов, состав решаемых управленческих задач.

Был сделан вывод о том, что в условиях управления статической адаптивностью, когда принимаемые управленческие решения относятся к строительству или модернизации конкретных элементов системы и требуется детальный технико-экономический анализ работы энергетической системы, допустимая погрешность должна быть минимальной. В то же время процесс управления динамической адаптивностью, в котором принимаемые управленческие решения направлены на создание институциональной среды, способствующей развитию национальной энергетической системы в направлении, обеспечивающем наибольший уровень ее адаптивных свойств, затрагивая области с высокой неопределенностью исходных данных, допускает их большую погрешность.

В целях повышения обоснованности стратегического планирования развития национальной энергетической системы и обеспечения энергетической безопасности страны были выделены и проанализированы факторы, формирующие адаптивность как энергетических систем в целом, так и их элементов, принадлежащих разным стадиям процесса создания и потребления энергетического ресурса. Было выявлено, что фундаментальные изменения, происходящие в мировой энергетике (появление новых технологий добычи, преобразования и транспортировки энергетических ресурсов; либерализация рынков электроэнергии; внедрение и широкое распространение малой генерации; интеграция национальных энергетических систем в мировую энергетику и др.), оказывают значительное влияние на факторы, определяющие адаптивность энергетических систем. Было показано, что эффективность и адаптивность энергетических систем ранее базировалась на наличии больших резервов как производственных мощностей, так и энергетических ресурсов. В настоящее время производственные и ресурсные резервы, оставаясь значимыми для обеспечения надежности функционирования энергетических систем,

утратили свою первостепенность в обеспечении адаптивности. На первый план в повышении гибкости и устойчивости энергетических систем все больше выходят факторы, ассоциируемые с устойчивой энергетикой: диверсификация видов потребляемых энергетических ресурсов; диверсификация структуры генерирующих мощностей по типу энергостанций; диверсификация поставщиков энергетических ресурсов; рост энергоэффективности производств и, как следствие, снижение энергоемкости экономики; развитие возобновляемых источников энергии и др.

## ГЛАВА 3. ОЦЕНКА УРОВНЯ АДАПТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### 3.1. Принципы и критерии оценки адаптивности энергетических систем в современных условиях

Анализ научной литературы, посвященной адаптивности энергетических систем, показал, что методы оценки адаптивности энергетических систем все еще находятся на стадии разработки, что обусловлено рядом таких причин, как многоаспектность понятия адаптивность; уникальность энергетических систем; динамичность и фундаментальность происходящих изменений в мировой энергетике; наличие большого числа не только количественных, но и качественных показателей, характеризующих адаптивность энергетических систем, формализованная оценка которых представляет собой сложную теоретическую и практическую задачу [103].

Несмотря на то, что за последние годы появились исследовательские работы [215, 228, 275, 286, 301, 302], охватывающие разные аспекты проблемы анализа свойства адаптивности, какой-то определенной, общепризнанной и универсальной методики оценки уровня адаптивности энергетических систем пока нет.

Выделяя те или иные аспекты адаптивности, авторы предлагают разные показатели, которые могут быть использованы для оценки ее уровня. Так Х. Вилис и К. Лоа [355] приводят сформированный ими в результате детального обзора имеющейся литературы перечень показателей, характеризующих адаптивность энергетических систем. Этот перечень содержит довольно большое количество разрозненных, разноплановых качественных и количественных, экономических и технических показателей, всю совокупность которых авторы разбивают на следующие группы:

1. Показатели, оценивающие исходное состояние системы (*input*): запасы энергетических ресурсов; транспортные возможности энергетической системы; структура мощностей энергетической системы и др.

2. Показатели, характеризующие возможность системы реагировать на стрессовые ситуации (*capacities and capabilities*): наличие согласованных организационных процедур и технического оборудования для аварийного отключения пострадавших элементов энергетической системы; уровень концентрации поставщиков энергетических ресурсов; соотношение максимального и минимального объема энергии, который может поставлять система; информационная безопасность; физическая безопасность энергетических объектов; возможность привлечения импортного оборудования; зависимость от иностранных производителей энергетического оборудования; инвестиционная привлекательность системы и др.

3. Показатели, характеризующие надежность работы системы (*performance*): количество аварийных ситуаций в год; экономическая эффективность работы системы; техническая и технологическая эффективность работы системы; количество перерывов в поставках энергии потребителям; наличие оборудования аварийного выключения и др.

4. Показатели, характеризующие результаты адаптации (*outcomes*): социальные и коммерческие затраты на снижение поставок энергии; стоимость недопоставленной энергии; затраты на адаптацию; волатильность цен на электроэнергию; ущерб окружающей среде; вред для здоровья населения; потери мощности в результате стрессовой ситуации и др.

Несмотря на достаточно большое число показателей, которые могут быть использованы при анализе уровня адаптивности энергетических систем, приведенных в рассматриваемой работе, авторами не предлагается какая-либо методика по свертыванию всей совокупности показателей для получения некоторой итоговой количественной оценки. Кроме того, предложенная Х. Вилисом и К. Лоа [355] классификация представляется неудобной, поскольку многие показатели могут быть отнесены сразу к нескольким группам, и, более того, иметь опосредованное отношение к адаптивности энергетических систем (как, например, показатели информационной и физической безопасности энергетических систем, которые больше отражают

надежность функционирования, а не возможности к адаптации). При этом представленная классификация не отражает стадии развития стрессовой ситуации и дальнейшей адаптации системы к ней.

В целях создания алгоритма оценки адаптивности энергетических систем мы предлагаем систематизировать существующие показатели адаптивности в соответствии с этапами адаптационного процесса, описанными П. Роже (табл. 3.1). Согласно П. Роже, адаптационный процесс включает четыре этапа [323]:

1. Подготовка / Планирование. Прогнозирование стрессовых ситуаций и разработка возможных мероприятий, направленных на стабилизацию работы системы.

2. Реагирование. Первая реакция системы на появление стрессовой ситуации, а также обеспечение функционирования энергетической системы при организационном и/или техническом отделении пострадавших элементов.

3. Восстановление. Восстановление функционирования всех элементов системы.

4. Адаптация. Проведение адаптационных мероприятий, направленных на максимизацию эффективности функционирования энергетической системы в новых условиях.

Таблица 3.1 – Соответствие разных групп показателей адаптивности энергетической системы этапам адаптационного процесса

Этапы адаптационного процесса	Группы показателей адаптивности энергетической системы
Подготовка / Планирование	Показатели, характеризующие период времени между значительными стрессовыми ситуациями разной природы; показатели, характеризующие техническое состояние энергетической системы
Реагирование	Показатели, характеризующие силу воздействия неблагоприятного события на функционирование энергетической системы
Восстановление	Показатели структурных, организационных и технических изменений работы энергетической системы, необходимых для восстановления ее эффективности
Адаптация	Показатели, характеризующие инвестиционную привлекательность энергетической системы

Источник: составлено автором

Из таблицы 3.1 видно, что на первом этапе адапционного процесса – подготовительном этапе – адаптивность энергетической системы может быть оценена с помощью показателей, характеризующих период времени между значительными стрессовыми ситуациями разной природы, и показателей, характеризующих техническое состояние энергетической системы. Для оценки периода времени между разного рода значительными стрессовыми ситуациями в докладе Европейской ассоциации производителей электроэнергии [321] предлагается использовать показатель уровня адаптивности энергетической системы  $R(t)$ , основанный на использовании времени работы системы без потери эффективности (*MTBF, mean time between fails*).

$$R(t) = e^{\frac{-t}{MTBF}} \quad (3.1)$$

где:  $t$  – рассматриваемый период функционирования системы.

Показатель  $R(t)$  характеризует степень надежности функционирования системы. Чем больше значение данного показателя, тем длиннее период падения эффективности.

Техническое состояние рассматриваемой энергетической системы может быть описано такими показателями, как структура мощностей энергетической системы, запас производственных мощностей, пропускная способность транспортной сети, КПД энергетических установок, показатель аварийности используемого оборудования, степень износа используемого оборудования, себестоимость производимой энергии, уровень концентрации поставщиков энергетических ресурсов и др.

Уровень адаптивности энергетической системы на этапе ее реагирования на произошедшее стрессовое событие может быть оценен на основе показателей, характеризующих силу воздействия неблагоприятного события на функционирование энергетической системы: степень уменьшения поставок энергетических ресурсов в результате стрессовой ситуации; период времени, необходимый для полного восстановления работы системы; финансовые потери энергетических компаний в результате возникновения стрессовой

ситуации; максимальная величина негативного изменения анализируемых факторов, способная привести к полной остановке работы энергетической системы и др.

Уровень адаптивности энергетической системы на этапе ее восстановления после реализации стрессовой ситуации может быть оценен при помощи показателей структурных, организационных и технических изменений работы энергетической системы, необходимых для восстановления эффективности ее функционирования: индекс роста производственных мощностей, индекс роста КПД энергетических установок, индекс изменения себестоимости производства энергии, индекс изменения транспортных затрат и т. д. Данные показатели характеризуют способность системы меняться в условиях стрессовой ситуации.

Непосредственно способность энергетической системы адаптироваться к произошедшим изменениям условий ее функционирования во многом определяется ее инвестиционной привлекательностью. Показатели инвестиционной привлекательности энергетической системы определяют объем инвестиций, который может быть привлечен на ее развитие или трансформацию в случае необходимости: уровень доходности энергетических компаний, входящих в энергетическую систему; уровень риска функционирования энергетических компаний; объем инвестиций, требуемых на адаптационные мероприятия и др.

Анализ факторов, формирующих адаптивные свойства энергетических систем, и используемых показателей оценки адаптивности позволил выделить следующие методические принципы оценки уровня адаптивности энергетических систем:

1. В процессе анализа адаптивности системы должны рассматриваться все этапы адаптационного процесса: от подготовки и планирования до адаптации.
2. При разработке адаптационных мероприятий необходимо учитывать интересы разных участников процесса производства и потребления энергии, включая оценку силы воздействия вероятных стрессовых ситуаций на



функционирование энергетических компаний и силы воздействия полного прекращения или снижения поставок энергетических ресурсов на экономику.

3. При прогнозировании стрессовых ситуаций и разработке возможных мероприятий, направленных на стабилизацию работы системы, необходимо осуществлять анализ продолжительности временных лагов между стрессовыми ситуациями, а также анализ времени восстановления функционирования системы после стрессовой ситуации. Кроме того, необходимо учитывать, что комплекс эффективных мероприятий, направленных на преодоление последствий стрессовой ситуации, будет меняться со временем в связи с изменениями самой энергетической системы.

4. При разработке возможных мероприятий, направленных на стабилизацию работы системы, необходимо осуществлять экономическую оценку затрат на адаптационные мероприятия.

5. Анализ адаптивности энергетической системы должен включать оценку способности системы привлекать ресурсы, необходимые для адаптационного процесса, извне.

Учитывая необходимость различения статической и динамической адаптивности в целях принятия управленческих решений в энергетике, оценка адаптивных свойств вариантов развития энергетической системы, осуществляемая в контексте обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны, должна осуществляться в соответствии со следующими принципами оценки динамической адаптивности национальной энергетической системы:

1. Оценка уровня динамической адаптивности национальной энергетической системы должна проводиться с учетом инерционных свойств системы.

2. В качестве важнейшей оцениваемой характеристики варианта развития национальной энергетической системы выступает не возможное скачкообразное увеличение спроса на энергетические ресурсы со стороны экономики, а долгосрочное положительное изменение его динамики.

3. Оценка инвестиционного потенциала энергетики, то есть потребностей в капиталовложениях и инвестиционной привлекательности энергетики, становится одним из ключевых направлений анализа.

4. Адаптивные мероприятия должны иметь превентивный характер, то есть разработка и осуществление адаптивных мероприятий должны проводиться не после реализации неблагоприятного события, а до нее. Поскольку стратегические угрозы энергетической безопасности медленно разворачиваются во времени и носят системный характер, главной задачей стратегического управления национальной энергетической системой является выявление этих угроз и корректировка текущего направления развития национальной энергетики.

Основываясь на анализе имеющихся показателей адаптивности, выделенных этапов адаптационного процесса и предложенных принципов ее оценки, может быть предложен следующий алгоритм оценки уровня адаптивности энергетической системы (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Алгоритм оценки уровня адаптивности энергетической системы

Источник: составлено автором

На **первом этапе** осуществляется анализ возможных стрессовых ситуаций. В процессе анализа определяются совокупность стрессовых ситуаций, угрожающих анализируемой системе, и их природа, а также оценивается регулярность возникновения стрессовых ситуаций.

В зависимости от технических и организационных особенностей энергетическая система может быть более адаптивна к стрессам одной природы и менее адаптивна к стрессам другой природы. Поэтому на первом этапе анализа необходимо классифицировать стрессовые ситуации по природе их возникновения и оценить адаптивность системы к разным группам стресса для выявления ее «слабых» и «сильных» сторон. В зависимости от источников возникновения стрессовые события можно объединить в следующие четыре группы:

1. Производственные стрессовые ситуации, связанные с производственными остановками и авариями, появлением новых технологий добычи, переработки и транспортировки энергетических ресурсов и др.

2. Финансово-инвестиционные стрессовые ситуации, связанные с ухудшением условий привлечения инвестиционных и кредитных ресурсов, неблагоприятными валютными колебаниями, ростом инфляции, увеличением налоговых выплат и др.

3. Рыночные стрессовые ситуации, связанные с ростом конкуренции, ухудшением условий торговли, изменением цен на энергетические ресурсы, неблагоприятным резким или постепенным изменением спроса, ухудшением условий международной торговли и др.

4. Социально-политические стрессовые ситуации, связанные с ростом политической напряженностью между странами, ужесточением экологических требований к энергетическим объектам и др.

По скорости проявления стрессовые ситуации могут быть классифицированы на:

- краткосрочные (быстропроявляющиеся стрессовые ситуации, чаще всего связанные с природными катаклизмами, авариями и прочими перебоями в работе);
- долгосрочные (стрессовые ситуации, происходящие в течение продолжительного времени и сложно идентифицируемые в начале процесса; как правило, это системные изменения, касающиеся той или иной стороны политической, социальной или экономической жизни государства).

В зависимости от возможности предсказания стрессовые события делятся на:

- предсказуемые;
- непредсказуемые.

К предсказуемым стрессовым событиям относятся события, которые уже происходили в прошлом, и для прогнозирования которых можно использовать статистические данные. К непредсказуемым стрессовым событиям относятся чрезвычайно редкие события, или события, которые не происходили вообще, и которые крайне сложно предугадать в будущем. К категории непредсказуемых событий также относятся события, известные под термином «черный лебедь», введенным Н. Талебом [337]. Данные события – уникальные, непрогнозируемые и оказывающие фундаментальное влияние на условия функционирования систем, не должны быть упущены при рассмотрении вопросов адаптивности больших систем энергетики.

На **втором этапе** оценки адаптивности энергетической системы проводится анализ текущего технико-экономического состояния системы. На данном этапе оцениваются технические и финансовые резервы энергетических компаний, являющихся частью анализируемой системы; производственная и экономическая эффективность функционирования системы; технические характеристики ключевых элементов энергетической системы (например, электрогенераторов, линий электропередач, пропускной способности транспортных сетей) и др. Данный этап является необходимым в целях оценки последствий реализации той или иной стрессовой ситуации для системы.

На **третьем этапе** оценивается сила воздействия стрессовых ситуаций на систему. Данный этап представляется одним из самых сложных этапов, поскольку необходимо спрогнозировать, как стрессовая ситуация повлияет на работу энергетической системы, насколько упадет ее производительность и экономическая эффективность, насколько и на какой период снизятся поставки энергетических ресурсов потребителям.

При оценке уровня адаптивности национальных энергетических систем на данном этапе необходимо проводить анализ влияния состояния региональных энергетических систем на уровень адаптивности ТЭК страны. Большую роль здесь играет степень интеграции региональной энергетической системы в энергетику страны. Укрупненно можно выделить две степени интеграции региональной энергетической системы в ТЭК страны: средняя степень интеграции и высокая степень интеграции. Средняя степень интеграции характеризуется наличием на территории региона технологически-изолированных энергетических систем, а также низким объемом оборота энергетических ресурсов с другими регионами страны. В случае средней интеграции уровень адаптивности энергетической системы региона учитывается при оценке адаптивности ТЭК страны как аддитивный фактор, который в процессе оценки не может выступать в качестве определяющего. Так, например, возможна ситуация, когда региональная энергетическая система за счет недостаточного наличия резервов мощности энергетических производств, высокого уровня изношенности основного оборудования и т.д. может быть охарактеризована как неадаптивная, в то время как энергетическая система страны может быть вполне адаптивна.

Высокая степень интеграции характеризуется наличием технических и технологических связей региональной энергетической системы с другими регионами страны, а также большим объемом оборота энергетических ресурсов, когда регион выступает поставщиком энергетических ресурсов или крупным их потребителем. Энергетическая система регионов с высокой

степенью интеграции оказывает значительное влияние на адаптивность ТЭК страны на качественном уровне.

На **четвертом этапе** анализируются возможные адаптационные реакции системы. Адаптационные мероприятия предназначены для уменьшения стресса от некоторого события. Однако в отличие от антикризисных мероприятий, которые возвращают энергетическую систему в зону нормального функционирования, адаптационные мероприятия призваны технически и/или организационно изменить систему так, чтобы она эффективно функционировала в новых условиях. При этом предполагается, что для погашения отрицательного влияния стрессовой ситуации не достаточно механизмов восстановления самой системы (проявления свойства устойчивости системы). Поэтому при анализе уровня адаптивности энергетической системы должны быть проработаны возможные управленческие реакции, в той или иной степени трансформирующие систему.

На **пятом этапе** оцениваются затраты на адаптационные мероприятия и источники их финансирования. Адаптационные мероприятия могут сопровождаться значительными финансовыми затратами, поэтому, с одной стороны, необходимо тщательно оценивать объем необходимых для системных трансформаций ресурсов, а с другой стороны, - проводить анализ источников их финансирования. Поскольку те или иные управленческие решения, направленные на адаптацию к стрессовым ситуациям, могут реализовываться с разной скоростью и требовать больших или меньших затрат, именно на данном этапе должен быть решен вопрос об экономически эффективном наборе возможных реакций на стрессовые ситуации.

На **шестом этапе** производится оценка уровня адаптивности энергетической системы в целом. Надо учитывать, что на вывод об уровне адаптивности энергетической системы будет влиять рассматриваемый горизонт прогнозирования (среднесрочный или долгосрочный). При среднесрочном горизонте прогнозирования оценивается текущее состояние системы и ее возможные реакции на стрессовые ситуации за счет осуществления

адаптационных мероприятий. При долгосрочном горизонте прогнозирования анализируются не только быстропроявляющиеся стрессовые ситуации, но и проявляющиеся постепенно, на которые энергетическая система может реагировать длительными трансформациями, связанными со структурными изменениями.

Процессы и события, в долгосрочной перспективе способные оказать неблагоприятное воздействие на энергетическую систему и потому являющиеся для нее стрессорами, могут иметь как внутреннее (обусловленное внутренними противоречиями и несбалансированностью работы рассматриваемой энергетической системы), так и внешнее (обусловленное взаимодействием рассматриваемой системы с другими системами) происхождение. Проведенный анализ показал, что российской энергетической системе в долгосрочной перспективе в большей степени угрожают внутренние стрессоры. Поэтому в качестве основных показателей оценки долгосрочной адаптивности национальной энергетической системы предлагается использовать показатели, основанные не на оценке времени восстановления энергоснабжения, а на оценке времени и затрат на структурные изменения в национальной энергетической системе, необходимые для налаживания поставок энергии в количестве, достаточном для текущего функционирования экономической и социальной сферы и для обеспечения их роста и развития. В этом случае при решении проблем обеспечения энергетической безопасности целевыми показателями становятся такие параметры, как инерционность и инвестиционная привлекательность. Первый критерий характеризует время, необходимое для трансформационных структурных изменений, второй – финансовую реализуемость необходимых структурных изменений.

Так как не существует единого набора показателей, который отвечал бы всем потребностям оценки уровня адаптивности энергетических систем, разработанный алгоритм оценки адаптивности представляет собой методическую базу для выбора системы показателей для каждого конкретного случая, отличающегося размером рассматриваемой энергетической системы,

горизонтом прогнозирования, технико-экономическими особенностями как среды функционирования, так и самой рассматриваемой энергетической системы. Особенностями предлагаемого подхода к оценке адаптивности является то, что он охватывает все этапы адаптационного процесса, базируется на выделенных принципах оценки адаптивности энергетических систем, а также учитывает не только рыночные и производственные, но и финансово-экономические и социально-политические стрессовые события.

### **3.2. Оценка уровня адаптивности альтернативных вариантов долгосрочного развития энергетических систем**

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) обладает рядом особенностей, которые выделяют данный сектор экономики из прочих отраслей. Во-первых, ТЭК, обеспечивающий потребности экономики в топливе и энергии, остается с начала промышленной революции ключевым сектором, роль которого в обеспечении экономической безопасности только возрастает. Во-вторых, ТЭК является инерционной отраслью, развитие которой в нужном для страны направлении может занять не один десяток лет, что приводит к необходимости заблаговременной разработки и реализации стратегических планов развития. В-третьих, ввиду большой значимости энергетики для социальной, экономической и военной безопасности страны системные кризисы в ТЭК имеют огромные последствия, в связи с чем правительства стран не могут полностью отпустить контроль над отраслью в надежде на ее саморегулирование благодаря свободному рынку. В-четвертых, ТЭК оказывает значительное неблагоприятное воздействие на окружающую среду, которое не может быть уменьшено за счет рыночных механизмов. В-пятых, начало XXI века показало, что энергетические ресурсы являются важным геополитическим инструментом, который, с одной стороны, может вызывать международные конфликты, а с другой стороны, может использоваться как инструмент воздействия на международных контрагентов.



В связи с этим роль прогнозирования и стратегического планирования развития энергетики сложно переоценить. Поэтому методы и модели прогнозирования, стратегического планирования, выработки инструментов управления развитием энергетических систем и др. продолжают активно разрабатываться в мире. Развитие методов и моделей осуществляется как в направлении учета технических, экономических и социальных изменений в мире, так и в направлении учета новых результатов в экономических и технических науках для получения более качественных и обоснованных управленческих решений, призванных увеличить эффективность и безопасность работы национальной энергетической системы. В этих условиях разработка метода оценки свойства адаптивности при анализе альтернативных вариантов развития энергетической системы является задачей, актуальной не только в рамках решения проблемы обеспечения энергетической безопасности страны, но и в целях повышения качества государственного управления экономикой в целом и энергетикой в частности.

Критерий адаптивности вариантов развития национальной энергетической системы может и должен использоваться при анализе вариантов развития ТЭК, поскольку в современных условиях роста неопределенности и важности решения проблем обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны, адаптивность является ключевым свойством больших систем энергетики, обеспечивающим возможность «изменения» варианта под меняющиеся потребности экономики в энергетических ресурсах, а потому выступающим базовым элементом обеспечения долгосрочной энергетической безопасности развития экономики.

Вариант развития национальной энергетической системы представляет собой стратегический план развития энергетики, затрагивающий и определяющий на долгосрочную перспективу такие характеристики и параметры, как:

- структура генерирующих объектов по типу электростанций;
- размер и динамика ввода генерирующих мощностей;

- объем добычи углеводородов;
- динамика освоения новых месторождений;
- затраты на строительство промышленной инфраструктуры;
- объемы инвестиций, необходимых для реализации выбранной стратегии;
- развитие финансовых инструментов;
- определение нормативных показателей работы компаний энергетической отрасли;
- инструменты государственного стимулирования энергетических компаний и др.

Вся совокупность параметров каждого конкретного варианта (стратегии) развития энергетики определяется исходя из принимаемого сценария развития национальной и мировой экономики. На рис. 3.2 приведена схема процесса прогнозирования спроса и цен на энергетические ресурсы, которые являются базовыми параметрами для разработки энергетической стратегии.

Несмотря на сложность и многофакторность каждой стратегии, с точки зрения решения проблем обеспечения энергетической безопасности, каждый имеющийся вариант имеет следующие базовые параметры:

- динамика цен на энергоносители;
- величина и динамика спроса на энергетические ресурсы;
- величина и динамика ввода новых производственных мощностей, необходимых для покрытия потребности в энергии;
- требуемый объем инвестиций;
- ввод новых нефте- и газопроводов и др.

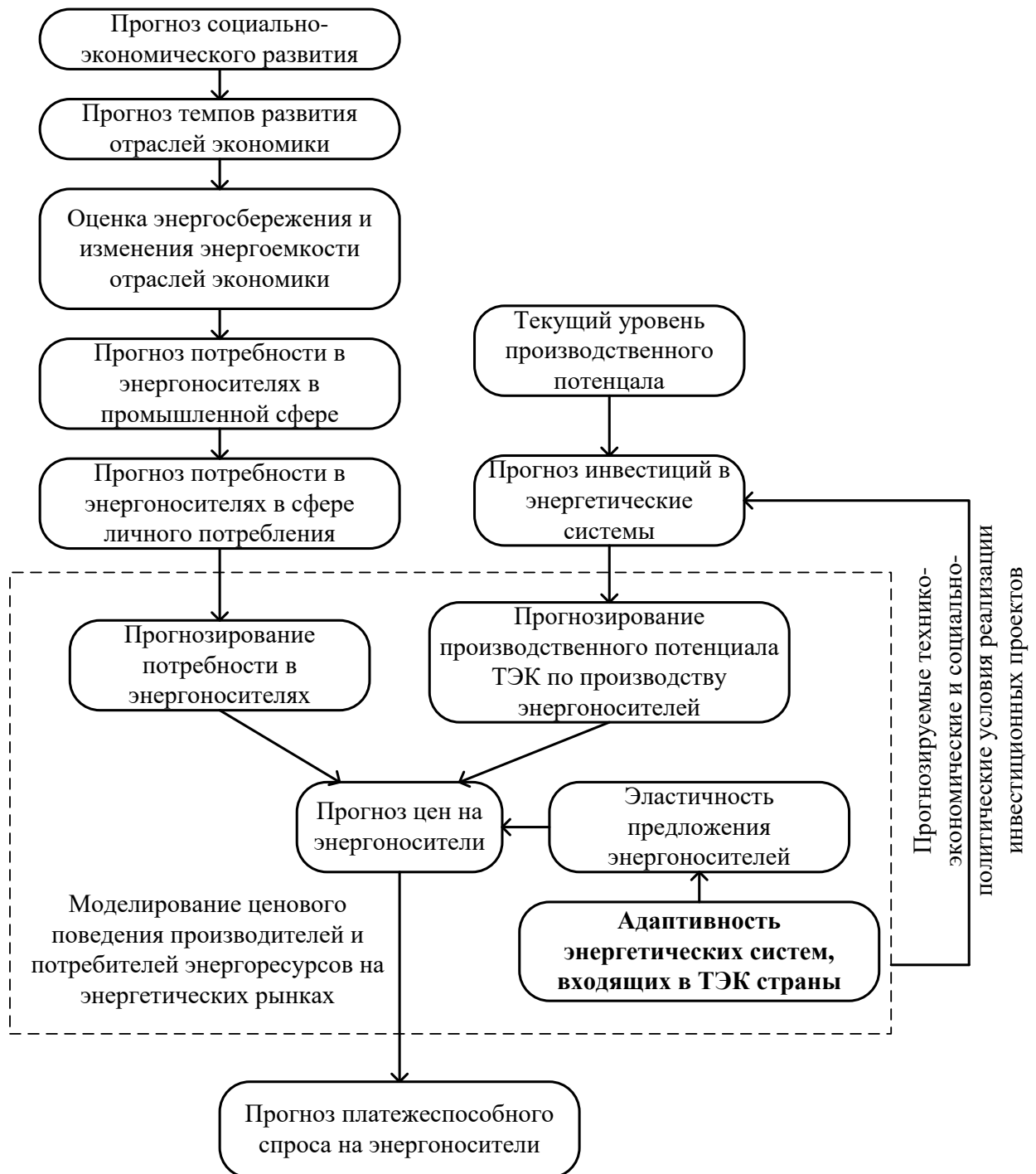


Рисунок 3.2 – Схема процесса прогнозирования спроса и цен на энергетические ресурсы с выделением в нем оценки адаптивности энергетической системы

Источник: составлено автором

Стратегия развития национальной энергетической системы должна ориентироваться на обеспечение энергетической безопасности страны, когда спрос на энергетические ресурсы удовлетворяется работой национальной энергетической системой при рыночных ценах. Оптимальной является та

ситуация, когда динамика развития национальной экономики соответствует динамике развития национальной энергетики. Задачей является разработать такой стратегический план развития ТЭК, который, с одной стороны, будет обеспечивать достаточное по сравнению с развитием экономики развитие энергетики, а с другой стороны, не будет создавать избыток производственных мощностей в энергетике, снижающих ее экономическую эффективность.

Частью стратегии развития национальной энергетической системы является разработка и осуществление государственной инвестиционной политики в энергетике, направленной на ввод в эксплуатацию новых и обновление имеющихся электрогенерирующих мощностей. Выбор метода оценки эффективности инвестиций в целом зависит от многих факторов: период инвестирования, форма инвестирования, характер неопределенности исходных данных (вероятностная, интервальная, вероятностно-интервальная), количество и характер участников (государственные и частные инвестиции) и т. д. Для энергетики кроме вышеперечисленных факторов особую роль в формировании критериальных показателей эффективности и выборе методов принятия управленческих решений играет уровень иерархии, к которому относятся разрабатываемые инвестиционные проекты, программы и стратегии.

Существуют различия в подходах к оценке инвестиционных проектов, программ и стратегий, относящихся к разным иерархическим уровням организации национальной энергетической системы (рис. 3.3).

В зависимости от того, к какому иерархическому уровню относятся инвестиции, в процессе оценки определяющими будут различные критерии эффективности. Кроме принадлежности к тому или иному уровню иерархии методы оценки и принятия решений будут отличаться в зависимости от того, являются ли рассматриваемые варианты инвестиций инвестиционными проектами, инвестиционными программами или инвестиционными стратегиями.



Рисунок 3.3 – Характеристика инвестиционных проектов, программ и стратегий в зависимости от иерархического уровня, к которому они относятся

Источник: составлено автором

Как видно из таблицы 3.2, с увеличением иерархического уровня приоритетные показатели эффективности меняются. Если на уровне компаний критериальным показателем выступает, например, чистый дисконтированный доход (ЧДД), количественно легко определяемый, то уже на уровне экономики региона показателями эффективности могут выступать развитие инфраструктуры региона и рост энергетической безопасности, которые в свою очередь представляют собой ряд не только количественных, но и качественных характеристик.

Таблица 3.2 – Критерии эффективности инвестиционных проектов, программ и стратегий

Уровень иерархии	Критерии эффективности	
	Инвестиционный проект и программа	Инвестиционная стратегия
Компания	Чистый дисконтированный доход (ЧДД); среднеквадратическое отклонение ЧДД	Рыночная капитализация компании; уровень рентабельности активов и собственных средств
Отрасль	Объем совокупной выработки в отрасли по видам топлива и энергии; уровень изношенности основного оборудования	Технологическое перевооружение производства
Экономика региона	Рост рабочих мест; увеличение регионального бюджета; развитие инфраструктуры	Развитие инфраструктуры региона; энергообеспечение экономики региона
Экономика страны	Обеспечение экономического роста страны энергетическим ресурсом; высокий уровень экологической безопасности; высокий уровень энергетической безопасности; снижение энергоемкости экономики; увеличение эффективности использования энергетических ресурсов	
Мировая экономика	Геополитическое положение государства; энергетическая безопасность страны; выполнение международных обязательств	

Источник: составлено автором

С увеличением иерархического уровня увеличивается и число критериев, по которым может осуществляться оценка эффективности. Это обуславливается тем, что чем выше затрагиваемый иерархический уровень, тем большее количество участников со своими особыми интересами необходимо рассматривать в процессе оценки, а само понятие эффективности начинает включать в себя не только коммерческую привлекательность, но и социально-политическую значимость.

При разработке в рамках государственной политики развития национальной энергетической системы стратегии ввода электрогенерирующих мощностей должен быть найден баланс между ее рискованностью (то есть вероятностью того, что вследствие опережающего развития экономики по сравнению с энергетикой национальная энергетическая система окажется неспособной удовлетворять в полной мере спрос на энергетические ресурсы) и эффективностью, характеризующейся отсутствием излишних инвестиций в энергетику (рис. 3.4).

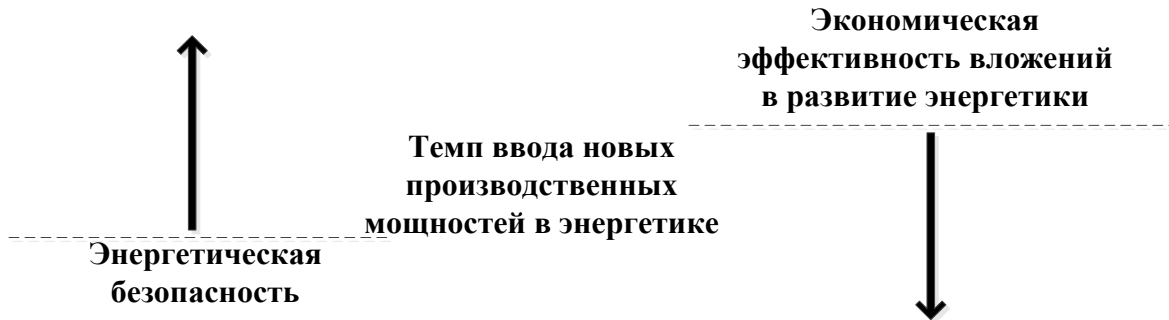


Рисунок 3.4 – Баланс между рискованностью и эффективностью стратегии ввода новых электрогенерирующих мощностей

Источник: составлено автором

Для разработки стратегии ввода новых электрогенерирующих мощностей предлагается использовать следующий метод оценки рисков реализации государственной отраслевой политики в области энергетики [100]. Если рост фактического спроса на электроэнергию за планируемый период оказывается больше, чем предусмотренное стратегическим планом увеличение электрогенерирующих мощностей, тогда для удовлетворения условно избыточного спроса  $\Delta D$  необходимо будет осуществить дополнительные инвестиции  $\Delta I$ , представляющие собой затраты на адаптацию стратегического плана к фактическим условиям.

$$\Delta D = D_f - D_p \quad (3.2)$$

$$\Delta I = I_f - I_p \quad (3.3)$$

где  $D_f$ ,  $D_p$  – фактический и запланированный объем спроса со стороны экономики на энергетические ресурсы соответственно, т.у.т. (или т.н.э.);

$I_f$ ,  $I_p$  – фактический и запланированный объем инвестиций соответственно, млн дол.

Прогнозируемый объем спроса на энергетические ресурсы и требуемый для соответствующего развития энергетической системы объем инвестиций определяются не для каждого рассматриваемого года, а суммарно для всего анализируемого периода. Если потребность в энергетических ресурсах

прогнозируется дискретными значениями по годам, тогда значение суммарного спроса находится по формуле:

$$D_p = \sum_{i=0}^n D_{pi} \quad (3.4)$$

Если динамика спроса задана непрерывной функцией, тогда значение суммарного спроса находится по формуле:

$$D_p = \int_0^n f(D_p) dD_p \quad (3.5)$$

где  $n$  – горизонт прогнозирования (лет).

Аналогичным образом рассчитывается суммарный объем инвестиций.

Продолжительность рассматриваемого периода (горизонта прогнозирования) может варьироваться, однако оптимальное его значение должно быть в районе 10–15 лет, поскольку при большем значении неопределенность будущего становится столь высокой, что влияние прогнозируемых значений на текущие управленческие решения в рамках рассматриваемых вариантов развития энергетики становится несущественным.

Ввиду прогнозного характера величины будущего спроса на энергетические ресурсы суммарный объем спроса на электроэнергию в процессе стратегического планирования развития электроэнергетики должен быть представлен интервалом возможных значений с соответствующим распределением вероятностей. На рис. 3.5 отображена функция распределения вероятностей величины суммарного спроса на энергетические ресурсы за период с 0 до  $n$  года.



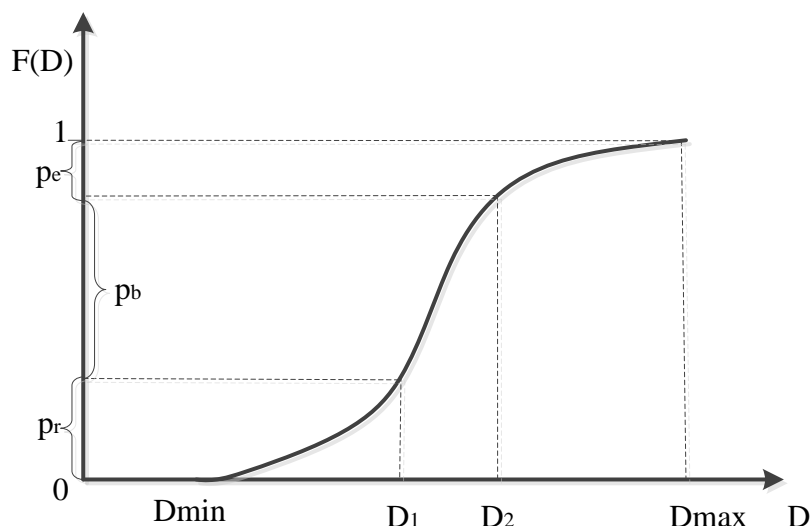


Рисунок 3.5 – Функция распределения вероятностей величины суммарного спроса на энергетические ресурсы

Источник: составлено автором

На рис. 3.5  $D_{min}$  и  $D_{max}$  означают минимальное и максимальное прогнозируемое значение суммарного спроса на электроэнергию в рассматриваемый период времени.  $[D_1; D_2]$  – наиболее вероятный диапазон значений фактической величины суммарного спроса на энергетические ресурсы, вероятность попадания в который составляет  $p_b$ .

В случае высокой неопределенности будущего развития национальной и мировой экономики прогнозируемый объем спроса может быть задан интервалом значений  $[D_{min}; D_{max}]$  с равномерным распределением вероятностей (рис. 3.6).

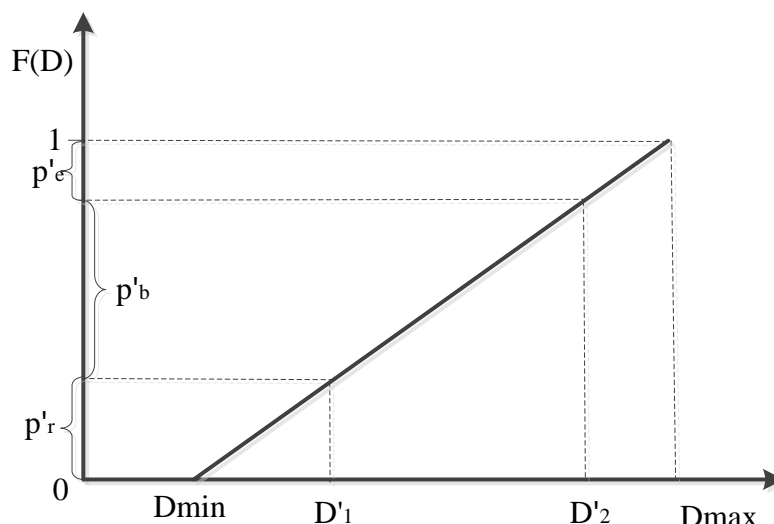


Рисунок 3.6 – Функция распределения вероятностей величины суммарного спроса на энергетические ресурсы в условиях интервальной неопределенности исходных данных

Источник: составлено автором

При формировании стратегии развития электроэнергетики исходной базой построения вариантов может быть или заданный интервал спроса  $[D_1; D_2]$  или значение вероятности попадания в интервал  $p_b$ . Характер распределения вероятности прогнозируемого спроса приводит к следующим зависимостям.

1. Равные интервалы прогнозируемого спроса соответствуют разным значениям вероятности попадания фактического спроса в них:

$$[D'_1; D'_2] = [D_1; D_2] \quad (3.6)$$

$$p'_b < p_b$$

2. Равные значения вероятности приводят к разным интервалам прогнозируемого спроса:

$$[D'_1; D'_2] > [D_1; D_2] \quad (3.7)$$

$$p'_b = p_b$$

где  $p_b$  и  $p'_b$  – вероятности того, что фактический спрос будет попадать в интервалы  $[D_1; D_2]$  и  $[D'_1; D'_2]$ , принятые в стратегии развития энергетической системы в качестве базовых вариантов при нормальном и интервальном распределении вероятностей соответственно.

Разные варианты стратегии развития энергетики могут быть разработаны как для одного интервала прогнозируемого спроса на энергетические ресурсы, так и для разных интервалов (рис. 3.7).

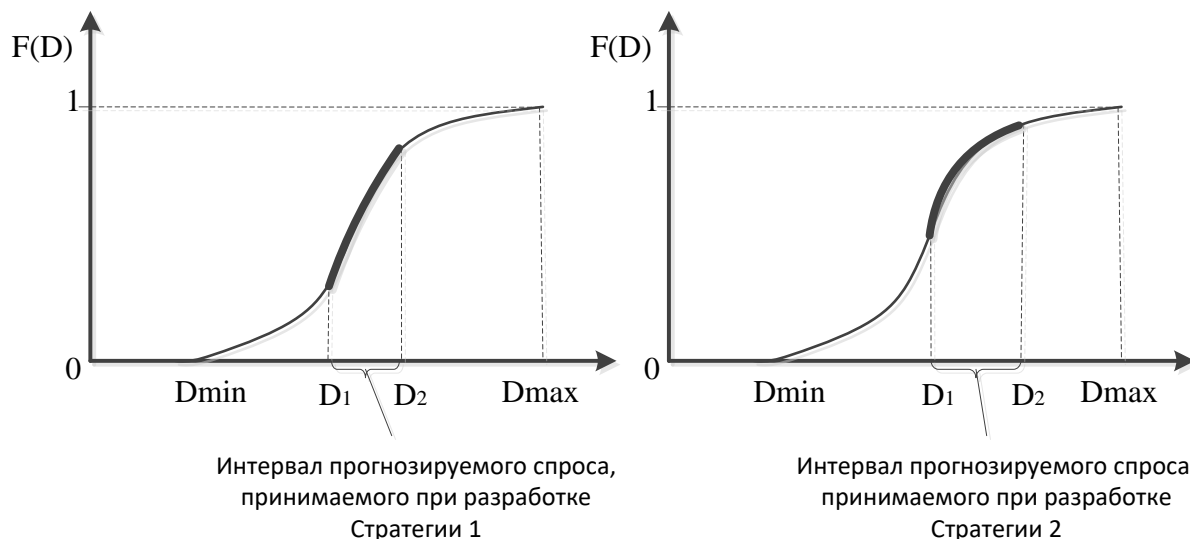


Рисунок 3.7 – Интервалы диапазонов значений спроса, принимаемых при разработке разных вариантов энергетических стратегий

Источник: составлено автором

Функция распределения потребности в энергетических ресурсах  $F(D)$  будет одинаковой для всех вариантов развития энергетики, поскольку она основывается не на самих вариантах развития, а на методах прогнозирования спроса на энергетические ресурсы. Иными словами, вначале с помощью тех или иных методов и моделей прогнозируется динамика спроса, а затем на ее основе разрабатываются разные альтернативные варианты стратегического развития национальной энергетической системы. В то же время, если одни варианты стратегии развития энергетики будут разработаны на основе одних прогнозов динамики спроса на энергетические ресурсы, а другие стратегии - на другом прогнозе, эти варианты будут несопоставимыми.

В современных условиях основной характеристикой устойчивости и рискованности развития энергетических систем является свойство адаптивности. В этом случае в качестве исходной формулы для анализа рискованности варианта развития энергетической системы может быть

использован коэффициент адаптивности системы к неблагоприятному изменению исходных параметров [160]:

$$I_a = \frac{E}{C_{ad}} \quad (3.8)$$

где  $E$  – системные последствия от некоторого стрессового события;

$C_{ad}$  – затраты на адаптивные мероприятия, направленные на восстановление эффективности работы системы.

Показатель  $I_a$  характеризует объем неблагоприятных изменений базовых параметров, который может быть нивелирован единицей затрат на адаптацию. Чем выше значение показателя, тем адаптивнее система к данному виду стресса.

Базовая формула показателя адаптивности энергетической системы  $I_a$  используется для оценки достоверного события и не учитывает вероятностный характер событий. В случае оценки долгосрочной (динамической) адаптивности вариантов развития энергетических систем, показатель адаптивности должен учитывать вероятность наступления неблагоприятного события. В условиях высокой неопределенности будущего размер затрат на адаптацию, нивелирующих последствия неблагоприятных событий, может быть определен как риск, а поскольку риск представляет собой произведение вероятности неблагоприятного события и величины ущерба от его наступления, показатель адаптивности системы может быть представлен следующим образом:

$$I_a = \frac{E}{C_{ad} \cdot p} \quad (3.9)$$

где  $p$  – вероятность наступления некоторого неблагоприятного события.

Чем выше значение индекса  $I_a$ , тем более эффективны адаптационные мероприятия.

Модифицированный показатель  $I_a$  может быть использован для оценки адаптивных свойств развивающейся энергетической системы не только в случае одного неблагоприятного изменения условий функционирования, но и в

случае неблагоприятного изменения совокупных условий реализации того или иного варианта развития системы. Следует отметить, что знаменатель индекса  $I_a$  характеризует совокупный уровень риска, присущий рассматриваемому варианту развития системы. Тогда риск может быть оценен по формуле:

$$R = \sum_{i=0}^n C_{adi} P_i \quad (3.10)$$

где  $p_i$  – вероятность наступления  $i$ -го события.

Поскольку центральное место при разработке и реализации стратегии развития национальной энергетической системы занимает оценка динамики спроса и инвестиций в энергетику, требуемых для соответствующего развития производственного потенциала, риск реализации варианта развития энергетической системы заключается в несоответствии планового введения генерирующих мощностей растущим потребностям экономики. Так как конкретный вариант развития энергетики разрабатывается под определенный сценарий развития экономики с соответствующей динамикой спроса на энергетические ресурсы, возможны три варианта исхода реализации энергетической стратегии:

1. Фактический спрос равен запланированному, что соответствует успешной реализации энергетической стратегии.

2. Фактический спрос на энергетические ресурсы окажется выше запланированного, тогда потребуются дополнительные адаптационные затраты в виде инвестиций в строительство новых генерирующих мощностей.

3. Фактический спрос на энергетические ресурсы окажется ниже запланированного, тогда часть фактически осуществленных инвестиций в строительство новых генерирующих мощностей окажется экономически неэффективной.

Учитывая неопределенность будущего, каждый вариант развития энергетики может быть описан рядом коэффициентов, оценивающих рискованность и адаптивность варианта развития. В качестве исходной

формулы для анализа рискованности варианта развития энергетической системы может быть использован рассмотренный выше модифицированный коэффициент адаптивности системы к неблагоприятному изменению исходных параметров  $I_a$ .

Для оценки адаптивных свойств анализируемого варианта развития энергетической системы может быть использован показатель  $I_e$ .

$$I_e = \frac{\Delta D_e}{\sum_{i=0}^n \frac{\Delta I_i}{(1+r)^i} \cdot p_e} \quad (3.11)$$

где  $\Delta D_e$  – разница между максимальным и минимальным значением из интервала  $[D_2; D_{max}]$ ;

$\Delta I_i$  – объем адаптационных инвестиций, осуществленных в  $i$ -ом периоде;

$p_e$  – вероятность попадания фактического значения спроса в интервал  $[D_2; D_{max}]$ .

Поскольку коэффициент  $I_e$  определяет уровень эффективности затрат на адаптивные мероприятия в случае превышения фактического объема потребности в энергетических ресурсах над запланированным, то чем больше его значение, тем адаптивнее и эффективнее вариант. То есть чем выше уровень адаптивности варианта, тем с меньшими затратами он может быть «подстроен» под новые условия функционирования энергетической системы, и тем ниже риски реализации данного варианта стратегии.

Для оценки риска падения спроса на энергетические ресурсы с последующим появлением избыточных производственных мощностей в энергетике может быть использован показатель  $I_r$ .

$$I_r = \frac{\Delta D_r}{\sum_{i=0}^n \Delta I_i (1+r)^{n-i} \cdot p_r} \quad (3.12)$$

где  $\Delta D_r$  – разница между максимальным и минимальным значением из интервала  $[D_{min}; D_1]$ ;

$p_r$  – вероятность попадания фактического значения спроса в интервал  $[D_{min}; D_1]$ ;

$\Delta I_i$  – излишек инвестиций, осуществленных в  $i$ -м периоде.

Чем выше значение данного показателя, тем менее чувствителен вариант к падению спроса с точки зрения проявления излишних инвестиций. Поскольку уменьшение фактического спроса по сравнению с запланированным приводит к избыточным инвестициям, при анализе индекса  $I_r$  необходимо учитывать величину упущенной выгоды от неэффективных инвестиций.

Интегральный показатель эффективности и рискованности варианта развития энергетики может быть получен с помощью аддитивной свертки критериев:

$$I_{ad} = l_e I_e + l_r I_r \quad (3.13)$$

$$l_e + l_r = 1 \quad (3.14)$$

Значения весовых коэффициентов  $l_e$  и  $l_r$ , определяются в зависимости от приоритетов субъекта оценки. Если приоритет отдается обеспечению энергетической безопасности страны, тогда значения могут быть следующими:

$$l_e = 0,7; l_r = 0,3$$

Если приоритет отдается инвестиционной эффективности варианта развития энергетической системы, то есть не должно быть излишне осуществленных инвестиций, тогда значения весовых коэффициентов могут быть следующими:

$$l_e = 0,3; l_r = 0,7$$

Поскольку отдача от дополнительных инвестиций может меняться в зависимости от объема и структуры электрогенерирующих мощностей, производственная эффективность инвестиций в рамках наиболее вероятного диапазона значений спроса, принимаемого при формировании стратегии, может быть выше, чем при дополнительных инвестициях в адаптационные мероприятия. Причин неравномерной отдачи от инвестиций может быть несколько. Во-первых, действие закона убывающей предельной отдачи капиталовложений при прочих равных факторах, описывающееся кривой на рис. 3.8.

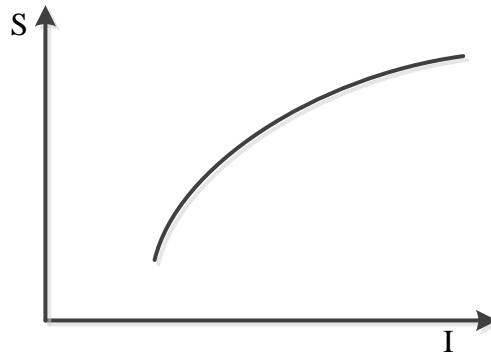


Рисунок 3.8 – Зависимость производственного потенциала энергетической системы ( $S$ ) от инвестиций ( $I$ )

Источник: составлено автором

Если рассматривать стратегию развития энергетики как набор отдельных инвестиционных проектов, тогда очевидно, что для базовой стратегии будут приняты к запуску наиболее эффективные промышленные объекты, тогда как дополнительные инвестиции будут осуществляться в замыкающие по эффективности проекты.

Во-вторых, структура и тип вводимых для покрытия спроса на энергетические ресурсы производственных мощностей будут оказывать сильное влияние на производственную отдачу от инвестиций. В таблице 3.3 приведены данные о средней величине инвестиции на сооружение 1 кВт мощности. Из таблицы 3.3 видно, что в рамках стратегии, отдающей приоритеты развитию традиционных источников энергии, будут осуществлены экономически более эффективные инвестиции, чем в рамках стратегии, основывающейся на возобновляемых источниках энергии. Поэтому отдача на инвестиции в рамках реализации стратегии и в рамках дополнительных адаптационных капиталовложений будут отличаться среди прочего в случае разных типов станций, вводимых для удовлетворения спроса на энергетические ресурсы.



Таблица 3.3 – Удельные инвестиции в электростанции разного типа в среднем по миру (долл./кВт)

Тип электростанции	Минимум	Среднее	Максимум
Газовые электростанции	627	1021	1289
Угольные электростанции	813	2080	3067
ГЭС	598	3492	8687
АЭС	1807	4249	6215
Ветровые электростанции	1200	1911	2999
Солнечные электростанции	937	1555	2563

Источник: составлено автором по [319]

Также разные варианты стратегии будут отличаться нормированной стоимостью электроэнергии (*Levelised cost of energy, LCOE*), представляющей собой среднюю дисконтированную себестоимость электроэнергии, производимой данным типом электростанции за весь срок ее службы:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n ((C_t + OM_t + F_t + C_{bt} + D_t) \cdot (1+r)^{-t})}{\sum_{t=0}^n MWh (1+r)^{-t}} \quad (3.15)$$

где  $C_t$  – инвестиционные затраты в году  $t$ ;

$OM_t$  – операционные затраты и затраты на содержание в году  $t$ ;

$F_t$  – затраты на топливо в году  $t$ ;

$C_{bt}$  – налог на выбросы  $CO_2$ ;

$D_t$  – затраты на демонтаж и утилизацию отходов в год  $t$ ;

$r$  – ставка дисконтирования;

$MWh$  – МВтч.

В таблице 3.4 представлены среднемировые показатели *LCOE*, рассчитанные для разных типов станций с использованием разных ставок дисконтирования.

Таблица 3.4 – Среднемировые показатели нормированной стоимости электроэнергии, долл./МВтч

Тип электростанции	r, %	Минимум	Максимум
Газовая электростанция	3	60	135
Угольная электростанция		65	95
АЭС		25	65
Газовая электростанция	7	65	138
Угольная электростанция		78	105
АЭС		38	100
Газовая электростанция	10	70	142
Угольная электростанция		82	120
АЭС		50	138

Источник: составлено автором по данным [319]

Кроме того, следует учитывать, что ввиду долгосрочности реализации стратегии развития национальной энергетической системы значительное влияние на эффективность инвестиций оказывает такой фактор, как научно-технический прогресс, благодаря которому кривая отдачи от инвестиций смещается влево (причем наклон кривой также может измениться) за счет, с одной стороны, роста энергоэффективности установок, а с другой – снижения затрат на установку 1 кВт мощности (рис. 3.9).

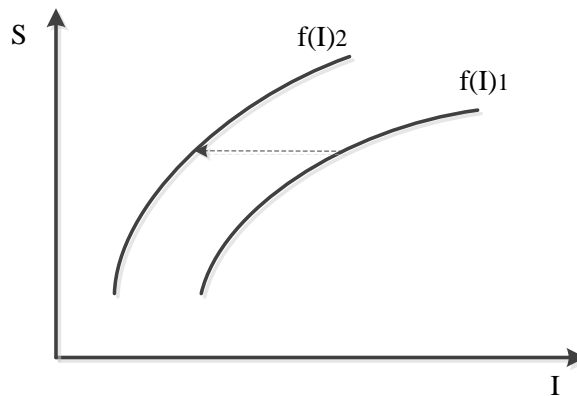


Рисунок 3.9 – Условный пример смещения кривой функциональной зависимости производственного потенциала энергетической системы (S) от инвестиций (I) влево за счет разработки и внедрения новых технологий

Источник: составлено автором

Одним из преимуществ предлагаемого метода анализа эффективности и рискованности вариантов развития энергетических систем является учет инерционных свойств энергетических систем: чем выше инерционные свойства варианта развития энергетической системы, тем больше дополнительных инвестиций необходимо осуществить для увеличения производственного потенциала системы в ответ на рост спроса на энергию. Инвестиции в развитие энергетической системы могут быть сокращены, если с течением времени будет выяснено, что экономика развивается более медленными темпами, чем прогнозировалось, и требует меньшего количества энергетических ресурсов, чем планировалось. Тогда чем менее инерционен проект, тем меньшее количество «излишних» инвестиций будет осуществлено. Таким образом, менее инерционным вариантам развития энергетических систем будет соответствовать более низкое значение интегрального показателя  $I_{ad}$ .

Предлагаемый метод оценки рискованности и эффективности варианта развития энергетической системы поможет выявить такой вариант, который, с одной стороны, стабилен в своей энергетической эффективности, с другой стороны, может быть легко адаптирован к возросшей потребности экономики в энергетических ресурсах, обеспечивая долгосрочную энергетическую безопасность страны. Преимущества разработанного метода заключаются также в том, что позволяя одновременно оценивать такие характеристики, как рискованность и эффективность, он дает возможность эксперту при анализе альтернативных вариантов развития энергетической системы учитывать социально-экономические приоритеты государственной отраслевой политики за счет изменения весов коэффициентов, используемых для расчета итогового интегрального показателя.

Апробация предложенного метода проведена на примере возможных вариантов развития электроэнергетики. Согласно данным Минэнерго, на начало 2020 г. Россия располагает 246 ГВт установленной мощности электростанций объединенных энергосистем при неполной загрузке генерирующих мощностей.

В процессе анализа рассмотрены четыре варианта развития электроэнергетики, базирующиеся на следующих исходных данных: уровень загрузки сохраняется на текущем уровне; ожидаемый ежегодный прирост потребности в электроэнергии составляет 1%; горизонт прогнозирования – 10 лет; ставка дисконтирования принята равной 7%. Принимаемые к расчету данные о располагаемой мощности электростанций и выработке электроэнергии взяты из аналитических отчетов Министерства энергетики РФ, о величине удельных инвестиций в расчете на кВт установленной мощности – из аналитического отчета Международного энергетического агентства (табл. 3.5).

Рассмотренные варианты отличаются структурой вводимых генерирующих мощностей:

- вариант 1 – структура вводимых генерирующих мощностей соответствует текущей структуре установленной мощности электростанций;
- вариант 2 – рост генерирующих мощностей, вводимых для покрытия возросшего спроса, осуществляется преимущественно за счет строительства ТЭС на газе;
- вариант 3 – рост генерирующих мощностей, вводимых для покрытия возросшего спроса, осуществляется преимущественно за счет строительства ГЭС и АЭС;
- вариант 4 – рост генерирующих мощностей, вводимых для покрытия возросшего спроса, осуществляется преимущественно за счет развития возобновляемых источников энергии.

Таблица 3.5 – Характеристика рассматриваемых вариантов развития электроэнергетики

	Располагаемая мощность, ГВт	Выработка, млрд кВтч	Инвестиции, долл./кВт	Структура вводимых генерирующих мощностей, %			
				1	2	3	4
ТЭС	164,612	681,8	1 021	66,8	79,2	26,3	35
ГЭС	49,870	138,8	3 492	20,2	8	20	20
АЭС	30,313	204,4	4 249	12,3	12	53	4
ВЭС	0,184	0,22	1 911	0,1	0,1	0,1	20
СЭС	1,362	0,8	1 555	0,6	0,6	0,6	21

Источник: составлено автором

Поскольку рассматриваемые варианты предполагают ожидаемый ежегодный прирост потребности в электроэнергии, равный 1%, наиболее неблагоприятной ситуацией, которую необходимо принимать во внимание при оценке рисков осуществления избыточных инвестиций, является нулевой рост потребностей в электроэнергии за весь рассматриваемый период (вероятность данного сценария принята равной 0,2). Тогда все инвестиции, осуществленные в рамках рассматриваемых вариантов, предполагающих однопроцентный рост, будут избыточными. Максимальный рост потребности в электроэнергии, для адаптации к которому будет необходимо осуществить дополнительные инвестиции, принимается равным 2% (вероятность данного сценария принята равной 0,05).

При расчете интегрального показателя  $I_{ad}$  преобразуем полученные значения  $I_e$  и  $I_r$  следующим образом: приняв наименьшее значение каждого из показателей среди всех анализируемых вариантов за единицу, выразим через него значения данного показателя, соответствующего другим вариантам. Результаты произведенных расчетов представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчетов показателей  $I_e$ ,  $I_r$  и  $I_{ad}$

Вариант	$l$	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$I_e$	0,3	7,69	7,05	8,83	1,00
$I_r$	0,7	1,68	2,01	1,00	1,68
$I_{ad}$		3,49	3,52	3,35	1,48

Источник: составлено автором

Анализ показал, что наиболее предпочтительными вариантами развития электроэнергетики являются варианты 1 и 2, причем вариант 2 является наиболее эффективным в условиях реализации политики уменьшения рисков осуществления избыточных инвестиций. Вариант 3 является эффективным с точки зрения осуществления адаптационных инвестиций для обеспечения роста потребности в электроэнергии, что обуславливается низкими нормированными затратами на производство электроэнергии ГЭС и АЭС, однако создает большие экономические риски возникновения избыточных капиталоемких

мощностей в случае реализации неблагоприятного варианта социально-экономического развития. В случае реализации варианта 4 возникает обратная ситуация – относительно низкие экономические риски сопровождаются высокими адаптационными издержками в случае реализации благоприятного варианта развития экономики.

Проведенные расчеты показали возможность использования разработанного метода в качестве дополнительного инструмента в процессе разработки и обоснования стратегии развития энергетических систем.

### **3.3. Управление адаптивностью энергетических систем в целях обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны**

Ввиду сложности организации национальной энергетической системы и ее исключительно важной роли в процессе обеспечения эффективного и бесперебойного функционирования национальной экономики все страны, независимо от уровня либерализации национального энергетического сектора, контролируют ее развитие. Государство использует те или иные инструменты прямого или косвенного воздействия для стимулирования и определения траектории развития национальной энергетической системы. Цели, задачи и инструменты проведения государственной энергетической политики определяются историческими, экономическими и политическими условиями. Однако в современных условиях мировое сообщество столкнулось с рядом фундаментальных долгосрочных задач, решение которых актуально для каждой страны в новой парадигме устойчивого развития: увеличение энергоэффективности национальной энергетической системы; рост ее экологичности; увеличение уровня энергетической безопасности национальной экономики. Такие же макрозадачи стоят и перед российским обществом, и решение их осуществляется в рамках разработки и реализации национальной энергетической политики, основные положения которой сформулированы в «Энергетической стратегии России на период до 2035 года» [6].

В современных условиях роста геополитической напряженности и необходимости форсированного развития экономики наиболее актуальной для России является задача обеспечения национальной энергетической безопасности. Проблема обеспечения национальной энергетической безопасности обостряется в условиях, когда вследствие глобализации и научно-технического прогресса производственные и энергетические системы становятся все более интегрированными и вертикально специализированными, в результате чего локальные сбои в поставках энергетических ресурсов, распространяясь по цепочкам производственно-хозяйственных связей, могут стать причиной значительных экономических потерь.

Национальная энергетическая система представляет собой сложную динамическую систему, развитие которой обусловлено как внутренними процессами, происходящими в самой системе, так и экзогенными факторами управляющего воздействия на нее со стороны самостоятельных акторов (компаний, правительства, международных контрагентов). Развитие внутренних тенденций энергетической системы, обусловленное логикой протекания технико-экономических процессов, может привести к увеличению ее адаптивных свойств. Такой тенденцией может быть, например, появление новых конкурирующих поставщиков энергетических ресурсов в условиях либерализации энергетического рынка, что при прочих равных условиях будет повышать адаптивность системы в целом. Однако для обеспечения стабильного роста адаптивных свойств национальной энергетической системы за счет увеличения ее эффективности и «правильного» использования результатов научно-технического и социального развития должно осуществляться управляющее воздействие на систему посредством разработки и реализации продуманной и научно обоснованной энергетической политики, непосредственно направленной среди прочего на обеспечение энергетической безопасности страны путем увеличения адаптивных свойств национальной энергетической системы.

Укрупненно можно выделить две группы методов реализации управляющего воздействия с целью увеличения адаптивных свойств национальной энергетической системы:

- методы косвенного воздействия;
- методы прямого воздействия.

Методы косвенного управляющего воздействия реализуются в рамках проведения энергетической и экономической политики, направленной на создание благоприятных условий функционирования национальной энергетической системы, то есть создание таких условий, в которых энергетические компании при разработке и внедрении адаптационных мероприятий не будут обременены излишними административными и экономическими барьерами. Методы прямого управляющего воздействия реализуются в рамках анализа особенностей функционирования национальной энергетической системы и принятия конкретных экономических и организационных мер, направленных на устранение ее «слабых» мест за счет увеличения надежности работы тех или иных элементов системы, создание новых межсистемных связей и др.

Таким образом, комплексное управляющее воздействие, направленное на развитие адаптивности национальной энергетической системы, предполагает, с одной стороны, создание таких правил и условий ее функционирования, в которых в случае реализации стрессовых событий пострадавший элемент системы может в максимально короткие сроки осуществить процесс адаптации, включающий такие этапы, как сбор информации, привлечение финансовых и материальных ресурсов, а также структурные изменения; с другой стороны, создание такого количества элементов и взаимосвязей между ними, которые максимально эффективно могли бы участвовать в перенаправлении потоков энергетических ресурсов в случае стрессового события.

Возникает вопрос, каким методам (прямого или косвенного воздействия) должен отдаваться приоритет при разработке комплекса мер, направленных на развитие национальной энергетической системы и повышение ее адаптивности.



Эффективность и приемлемость используемых методов зависит от текущей ситуации и необходимости вмешательства государства в развитие национальной энергетической системы [98]. Методы прямого воздействия, безусловно, являются более затратными, поскольку они связаны с непосредственным финансированием инвестиционных проектов в энергетике, предоставлением льготных займов энергетическим компаниям и т.д., в то время как методы косвенного воздействия несут в основном затраты в области государственного администрирования. Использование методов прямого воздействия эффективно и необходимо в случае решения проблем обеспечения энергетической безопасности в среднесрочной перспективе (то есть в период запуска новых энергетических объектов), в то время как косвенное воздействие, создавая благоприятные условия развития энергетических компаний и требуя значительно большего времени для проявления своих положительных результатов, должно быть направлено на создание долгосрочных положительных трендов увеличения адаптивности национальной энергетической системы. Основные характеристики разных методов управляющего воздействия на энергетическую систему представлены на рис. 3.10.

На рис. 3.10 видно, что косвенное управляющее воздействие на национальную энергетическую систему затрагивает не только ТЭК, но и условия функционирования экономики страны в целом, так как взаимосвязь экономики и энергетики обуславливает необходимость увеличения адаптивности национальной энергетической системы одновременно с развитием адаптивных свойств национальной экономики.



Рисунок 3.10 – Основные характеристики разных методов управляющего воздействия на энергетическую систему

Источник: составлено автором

Адаптивность экономики страны включает в себя три элемента (рис. 3.11):

- адаптивность элементов экономической системы на микроуровне;
- адаптивность элементов экономической системы на мезоуровне;
- адаптивность экономической системы в целом.

Поскольку ТЭК страны требует большого объема финансовых и материальных ресурсов, стабильность его функционирования обеспечивается стабильностью работы других отраслевых систем национальной экономики в условиях финансово-экономических кризисов, а также в условиях введения международных санкций. Таким образом, управляющее воздействие, направленное на увеличение адаптивности национальной энергетической

системы, должно быть ориентировано как на функционирование самой системы, так и на общеэкономические условия ее функционирования.

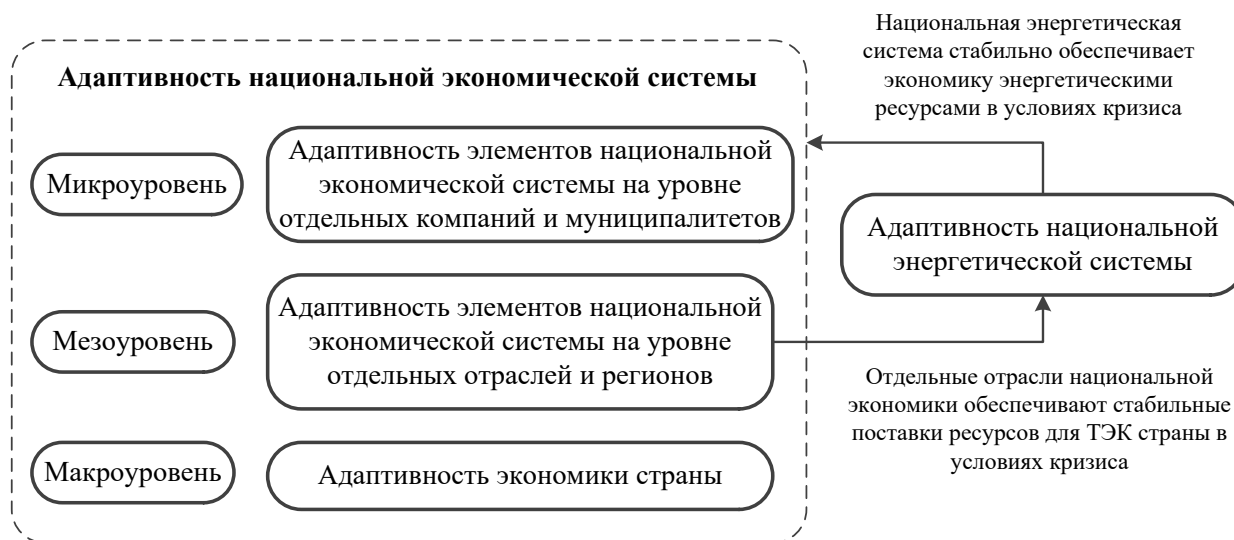


Рисунок 3.11 – Взаимосвязь между адаптивностью национальной энергетической системы и адаптивностью экономики страны

Источник: составлено автором

Мероприятия, направленные на повышение уровня адаптивности национальной энергетической системы, могут быть сгруппированы в соответствии с этапами адаптационного процесса, который включает в себя такие фазы, как возникновение стрессового события, реакцию системы на стрессовое событие, сопровождаемое падением эффективности ее функционирования (в отношении энергетических систем выражаемым в падении или полном прекращении поставок энергетических ресурсов), разработку адаптационных мероприятий и их внедрение, возврат системы к эффективному функционированию. При разработке комплекса мероприятий необходимо учитывать особенности каждого этапа адаптационного процесса и направлять усилия на повышение общей эффективности адаптационного процесса, что означает, с одной стороны, сокращение времени, необходимого системе для полного восстановления своей эффективности после возникновения стрессового события, а с другой стороны, снижение требуемых адаптационных затрат. Таким образом, меры, направленные на повышение

адаптивности национальной энергетической системы, могут быть объединены в следующие блоки:

1. Меры, направленные на снижение вероятности наступления стрессовых ситуаций и силы их проявления.

2. Меры, направленные на снижение негативных последствий возникновения стрессового события.

3. Меры, направленные на уменьшение времени, необходимого для полного восстановления системой своей эффективности.

Следует отметить, что увеличение общей эффективности адаптационного процесса имеет не линейный (аддитивный) характер, когда общая эффективность представляется как сумма эффективностей каждого этапа адаптационного процесса, а нелинейный характер, поскольку эффективная реализация мер в рамках одного этапа адаптационного процесса может значительно облегчить разработку мер и их успешную реализацию в рамках другого этапа адаптационного процесса. Взаимосвязь разных групп мероприятий, осуществляемых в рамках реализации разных этапов адаптационного процесса, представлена на рис. 3.12.



Рисунок 3.12 – Взаимосвязь мероприятий, относимых к разным этапам адаптационного процесса

Источник: составлено автором

Комплекс мер, направленных на повышение уровня адаптивности национальной энергетической системы, должен объединять не только все этапы адаптационного процесса, но также и все структурные элементы энергетической системы, относящиеся к разным этапам процесса производства, транспортировки и потребления энергетических ресурсов. В табл. 3.7 величина  $v_{ij}$  отражает систему мероприятий, направленных на повышение адаптивности энергетических подсистем, затрагивающих  $i$ -й этап адаптационного процесса и  $j$ -й этап процесса производства энергии.

Таблица 3.7 – Матрица мероприятий, направленных на повышение уровня адаптивности национальной энергетической системы, объединяющая этапы процесса адаптации и процесса производства и потребления энергии

	Добыча энергетического ресурса	Переработка энергетического ресурса и преобразование энергии	Транспортировка / Передача и распределение энергии	Потребление энергии
Возникновение стрессового события	$v_{11}$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{14}$
Реакция системы на стрессовое событие	$v_{21}$	$v_{22}$	$v_{23}$	$v_{24}$
Разработка адаптационных мероприятий	$v_{31}$	$v_{23}$	$v_{33}$	$v_{34}$
Внедрение адаптационных мероприятий	$v_{41}$	$v_{24}$	$v_{43}$	$v_{44}$
Восстановление работы системы (адаптация)	$v_{51}$	$v_{25}$	$v_{53}$	$v_{54}$

Источник: составлено автором

Как отмечалось выше, обеспечение долгосрочной энергетической безопасности России должно основываться не на увеличении объемов добычи углеводородов и обеспечении стабильности их поставок, а на повышении качества и эффективности энергоснабжения. Соответственно, при разработке мероприятий, направленных на повышение уровня адаптивности национальной энергетической системы, основные усилия должны быть сосредоточены на стадиях переработки энергетического ресурса и преобразования энергии, транспортировки/передачи и распределения энергии и потребления энергии.

Развитие современных энергетических систем определяется тенденцией к увеличению их сложности. Сложная система – это система, в которой взаимодействует большое количество независимых элементов и подсистем, что приводит к возникновению эмерджентных свойств. Сложность топливно-энергетического комплекса формируется не только количеством элементов в его структуре, но также их технологическим, организационным и экономическим разнообразием и большим количеством разноплановых взаимосвязей между ними, возникающих в том числе за счет появления и развития новых цифровых технологий, усложнения взаимосвязей между национальными энергетическими системами, увеличения числа акторов на энергетическом рынке, появления активных потребителей и т.д.

Появление новых элементов национальной энергетической системы может приводить к поддержанию высокого уровня адаптивности. В то же время рост сложности системы может приводить к увеличению ее уязвимости, поскольку новые элементы и взаимосвязи могут подвергаться воздействию стрессоров и нарушать работу других элементов системы (рис. 3.14).

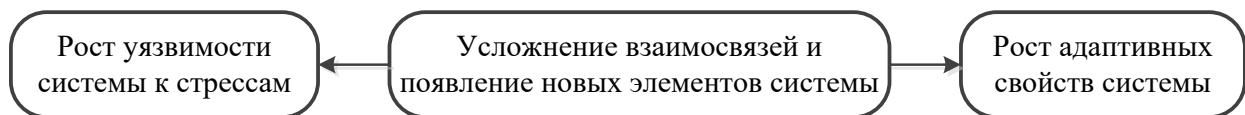


Рисунок 3.13 – Изменения адаптивных свойств системы в результате ее усложнения

Источник: составлено автором

В связи с этим при разработке энергетической политики, направленной на увеличение адаптивности национальной энергетической системы при росте ее сложности в условиях цифровизации и появления новых источников энергии, должны быть учтены следующие **принципы добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему:**

1. Новый элемент системы должен приносить в систему дополнительную «избыточность» в виде увеличения резервной мощности,

пропускной способности межсистемных связей, новых резервов первичных энергетических ресурсов и т. д.

2. Новый элемент как технологическая, экономическая и самоуправляемая единица должен сам обладать адаптивными свойствами, которые позволят ему устойчиво функционировать в условиях стрессовых ситуаций.

3. Появление новых элементов в энергетической системе должно соответствовать принципу необходимого разнообразия У. Р. Эшби. Согласно этому принципу, устойчивость системы может быть повышена за счет увеличения управляемого разнообразия структурных элементов системы (то есть элементов и связей между ними). Или, другими словами, чем больше разнообразных действий доступно для системы управления, тем больше возмущений она сможет компенсировать. В отношении энергетических систем данный принцип проявляется в том, что появление новых элементов системы должно расширять управленческий инструментарий энергетических компаний и государства.

4. Новый элемент должен быть направлен на снижение инерционности системы. ТЭК является высоко инерционной системой, структурные изменения в которой требуют значительного времени. Уровень инерционности национальной энергетической системы имеет обратную связь с уровнем ее долгосрочной адаптивности. Таким образом, для повышения уровня адаптивности национальной энергетической системы новый элемент должен быть направлен на снижение ее инерционности за счет уменьшения капиталоемкости новых объектов электрогенерации, облегчения правового сопровождения реализации инвестиционных проектов в энергетике, развития межсистемных связей, развития малой распределенной энергетики, появления и широкого распространения активных потребителей и др. Активным потребителем электроэнергии является потребитель, который наряду с централизованным электроснабжением, использует свою собственную электрогенерацию, что позволяет ему, применяя технологии *Smart grids*,

самостоятельно принимать решения о режиме своего электропотребления и реализовывать излишки генерируемой им электроэнергии. Технологии *Smart grids* делают возможным сглаживать пиковые нагрузки, снижать системные резервы, оптимизировать режим работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращать расходы и потери электроэнергии.

5. Новый элемент должен быть направлен на рост диверсификации потребляемых энергетических ресурсов (в направлении увеличения доли возобновляемых источников энергии), структуры генерирующих мощностей по типу электростанций и поставщиков электроэнергии. Диверсификация данных структурных характеристик приводит к увеличению долгосрочной адаптивности национальной энергетической системы за счет увеличения ее гибкости в отношении возможности реализации наиболее экономически и технически эффективных ответов на стрессовые ситуации.

Учитывая серьезные изменения, происходящие в настоящее время в мировом энергетическом секторе, основной движущей силой которых являются технологические инновации, способствующие переходу энергетических систем на принципиально новый этап развития, повышение устойчивости и адаптивности национальной энергетической системы станет возможным, если новые элементы системы будут соответствовать новой парадигме развития энергетики – устойчивой энергетике.

В последние десятилетия в мировой экономике произошли значительные трансформации, повлекшие за собой изменения в функционировании современных энергетических рынков, и как следствие, изменения требований к энергетическим объектам и инфраструктуре рынков электроэнергии в целом [8, 11, 27, 30, 80, 82, 131, 148]:

1. Рост мирового спроса на электроэнергию и изменение его структуры. Основными факторами роста потребления электроэнергии в мире являются глобальный рост населения и увеличение качества жизни населения. По данным Международного энергетического агентства, к 2040 году производство электроэнергии вырастет с 25 500 ТВтч до 40 000 ТВтч. В то же время, по мере



того, как новые технологии и развитие распределенной генерации делают просьюмеров все более эффективными участниками энергетического рынка, демаркационная линия между производителями и потребителями электроэнергии будет размываться, а доля просьюмеров в структуре производства и потребления энергии будет постепенно расти. Кроме того, изменению структуры спроса на электроэнергию будут способствовать изменения в промышленности, обусловленные развитием технологической базы, чувствительной к качеству электроэнергии и надежности ее поставок.

2. Рост спроса на экологичную энергетику. Производство электроэнергии из ископаемого топлива является значительным источником выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, что приводит к ухудшению состояния окружающей среды, снижению качества жизни населения и росту государственных расходов на здравоохранение и природоохранные мероприятия. В результате в целях повышения качества жизни многие развитые и развивающиеся страны готовы использовать более дорогую, но в то же время более экологически чистую энергию. Разработка и внедрение новых энергетических технологий повышает устойчивость национальной энергетической системы путем создания новых сложных адаптивных структур.

3. Продолжающаяся урбанизация. Высокие темпы роста количества новых городов и развития старых приводят к необходимости развития городских энергетических систем, которые должны быть надежными в условиях высокой пространственной плотности использования энергии. Основными целями развития городских энергетических систем являются снижение затрат на подключение к электросетям, повышение энергоэффективности, сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, использование новых методов размещения энергетических объектов в условиях высокой стоимости городских земель и т. д.

4. Старение крупных электростанций. В настоящее время во всем мире наблюдается старение крупных угольных электростанций, гидроэлектростанций и атомных электростанций. Так, например, по данным

Управления энергетической информации США (EIA), представленных на официальной странице организации, средний возраст коммерческих реакторов в США составляет около 37 лет. Около 74% всех угольных электростанций в США старше 30 лет. Анализируя средний возраст и технический срок службы действующих электростанций в Европе, Дж. Фарфан и Ч. Брейер делают вывод, что к 2030 году будет выведено из эксплуатации 48,6% мощностей газовых электростанций, 78,3% мощностей нефтяных электростанций, 79,1% мощностей угольных электростанций и 81,7% мощностей атомных электростанций [238]. Хотя сложившаяся ситуация способствует технологическому переходу к устойчивой энергетике, национальные энергетические системы требуют значительных инвестиций на модернизацию своих элементов.

Традиционные энергетические системы развивались при сильной государственной поддержке [192]. В последние несколько десятилетий правительства развитых стран сократили степень своего вмешательства в энергетическую отрасль из-за либерализации энергетических рынков. В то же время банки не проявляют интереса к крупным энергетическим проектам из-за наличия более привлекательных инвестиционных проектов. Для решения проблемы поддержания, обновления и модернизации национальных энергетических систем необходимо осуществить переход к новой парадигме электроэнергетики, ориентированной на инвестиции в возобновляемые источники энергии, распределенную генерацию и инновационные технологии.

5. Цифровизация энергетики. В последние годы национальные энергетические системы наряду с другими отраслями промышленности претерпели значительные изменения. Внедрение новых технологий в энергетику позволило увеличить стабильность национальных энергетических систем, повысить энергоэффективность мировой экономики, выделить просьюмеров как новых участников энергетического рынка и т.д.

Происходящие изменения способны кардинально изменить современные энергетические рынки, и именно поэтому очень важно учитывать их при

разработке мероприятий, направленных на повышение адаптивности национальной энергетической системы. Осознавая то, что высокая адаптивность национальной энергетической системы не может быть обеспечена без соответствия современным тенденциям в мировой экономике и энергетике, в последние годы правительство взяло курс на модернизацию российского электроэнергетического сектора.

Процесс цифровизации энергетики, сопровождающийся внедрением новых технологий, изменением стандартов информационной безопасности энергетических систем, появлением новых участников рынков электроэнергии и изменением требований к объектам и инфраструктуре электроэнергетических рынков, привел к необходимости совершенствования соответствующего законодательства. Так, например, в 2018 г. в Федеральный закон от 26 марта 2003 года № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» был внесен ряд изменений, касающихся регулирования отношений на оптовом и розничных рынках электроэнергии, а также введены единые требования к интеллектуальным приборам и системам учета электроэнергии.

Внесенные изменения определяют максимально допустимый объем поставок мощности генерирующими объектами, функционирующими на территории присоединяемой энергетической системы, сроки оснащения присоединяемой электроэнергетической системы необходимыми средствами измерений, особенности технологического присоединения к электрическим сетям, а также дают возможность поставщикам электроэнергии бороться с неплатежами и хищениями электрической энергии.

Внедрение интеллектуальных приборов и создание единой системы учета электроэнергии позволит повысить адаптивность российской энергетической системы за счет уменьшения количества технологических сбоев в поставках электроэнергии и сокращения сроков ликвидации их последствий, контроля качества потребляемой электроэнергии, снижения потерь электроэнергии и операционных затрат [142, 272, 273].

Как отмечалось ранее, рост сложности системы в результате появления в ней новых элементов и взаимосвязей может создавать дополнительные риски и иметь негативные последствия. В целях обеспечения долгосрочной устойчивости и адаптивности российской энергосистемы необходимо в законодательном порядке устанавливать правила и механизмы взаимодействия элементов энергетической системы и участников рынков электроэнергии. Так, например, необходимо определить права и обязанности просьюмеров, уточнить правила работы торговых систем на рынках распределенной генерации с учетом растущего числа просьюмеров, пересмотреть технические стандарты для вводимых в эксплуатацию энергетических объектов.

В целях надежного и качественного обеспечения потребностей внутреннего рынка в энергии на принципах энергосбережения и энергоэффективности, а также преобразования энергетики и других приоритетных отраслей экономики посредством внедрения цифровых технологий, были внесены соответствующие изменения в ряд государственных программ стратегического развития России [4]. Изменение стратегических ориентиров повлекло за собой корректировку государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» [2] и утверждение новой доктрины энергетической безопасности страны [1]. Для обеспечения устойчивого и эффективного функционирования структурных элементов энергетической системы, относящихся к разным этапам процесса производства, транспортировки и потребления энергетических ресурсов, определены направления дальнейшей работы по совершенствованию нормативной базы и снижению административных и иных барьеров в целях привлечения инвестиций в энергетику; установлены целевые ориентиры, касающиеся инвестиций в основной капитал в разных отраслях ТЭК; запланировано проведение ряда мероприятий по обеспечению устойчивого энергоснабжения потребителей на отдельных территориях Российской Федерации, а также по развитию магистральной электрической сети; предусмотрены меры стимулирования производства электроэнергии на основе

использования возобновляемых источников. Поддерживая производителей экологически чистой энергии и частично перераспределяя налоговую нагрузку компаний топливно-энергетического комплекса, Министерство финансов Российской Федерации предложило ввести экологический налог, который должен заменить существующие платежи за негативное воздействие на окружающую среду. Согласно предложению, фиксированные налоговые ставки будут применяться к выбросам различных веществ в воздух, сбросам в воду, а также к удалению промышленных отходов.

Энергетическая политика, направленная на обеспечение энергетической безопасности страны посредством увеличения адаптивных свойств национальной энергетической системы, должна учитывать выделенные принципы структурных изменений ТЭК страны. Однако в условиях рыночной экономики, когда большая часть решений относительно реализации тех или иных энергетических проектов принимается на уровне энергетических компаний, разработка и реализация комплекса мер, направленных на увеличение адаптивности национальной энергетической системы, становится действительно сложной задачей, поскольку необходимо не только решать технико-экономические проблемы функционирования национальной энергетической системы в условия проявления стрессовых ситуаций, но и создавать систему стимулов для ориентации руководства и собственников энергетических компаний на включение критерия адаптивности энергетических объектов (вновь создаваемых или модернизируемых) в процесс принятия управленческих решений.

Развитие методологии обоснования системы мероприятий, направленных на повышение адаптивности национальной энергетической системы, является необходимой частью разработки эффективной национальной энергетической политики в новых быстро меняющихся условиях функционирования ТЭК, а также с учетом сдвигов в парадигме развития энергетики, когда приоритетными направлениями становятся энергетическая безопасность, экологическая чистота и надежность топливоснабжения. Повышение обоснованности стратегических

решений в энергетике должно осуществляться посредством интеграции новых критериев энергетической и экономической эффективности, а также новых принципов развития национальной энергетической системы в процесс принятия решений.

**Выводы по третьей главе.** Анализ научной литературы, посвященной оценке уровня адаптивности, показал, что методы оценки адаптивности энергетических систем все еще находятся на стадии разработки, что обусловлено рядом таких причин, как многоаспектность понятия «адаптивность»; уникальность реальных энергетических систем; динамичность и фундаментальность изменений, происходящих в мировой энергетике; наличие большого числа не только количественных, но и качественных показателей, характеризующих адаптивность энергетических систем, формализованная оценка которых представляет собой сложную теоретическую и практическую задачу.

Было показано, что выделяя те или иные аспекты адаптивности, авторы предлагают разные показатели, которые могут быть использованы для оценки ее уровня. Однако, несмотря на достаточно большое число таких показателей, в настоящее время не существует методик по свертыванию всей совокупности показателей для получения комплексной количественной оценки уровня адаптивности энергетических систем. В целях создания алгоритма комплексной оценки адаптивности энергетических систем существующие показатели адаптивности были систематизированы в соответствии с этапами адаптационного процесса.

Анализ факторов, формирующих адаптивные свойства энергетических систем, и используемых показателей оценки адаптивности позволил выделить методические принципы оценки уровня адаптивности энергетических систем, которые в дальнейшем были использованы для разработки алгоритма комплексной оценки уровня адаптивности энергетической системы. Так как не существует единого набора показателей, который отвечал бы всем потребностям оценки уровня адаптивности энергетических систем,

разработанный алгоритм оценки адаптивности представляет собой методическую базу для выбора системы показателей для каждого конкретного случая, отличающегося размером рассматриваемой энергетической системы, горизонтом прогнозирования, технико-экономическими особенностями как среды функционирования, так и самой рассматриваемой энергетической системы. Особенностями предлагаемого подхода к оценке адаптивности является то, что он охватывает все этапы адаптационного процесса, базируется на выделенных принципах оценки адаптивности энергетических систем, а также учитывает не только рыночные и производственные, но и финансово-экономические и социально-политические стрессовые события.

Обоснована необходимость использования критерия адаптивности при анализе стратегий (вариантов) развития национальной энергетической системы. С целью повышения обоснованности принимаемых стратегий энергетического развития в результате исследования был разработан метод оценки уровня адаптивности альтернативных вариантов развития энергетической систем, позволяющий находить баланс между рискованностью рассматриваемой стратегии (то есть вероятностью того, что вследствие опережающего развития экономики по сравнению с энергетикой национальная энергетическая система окажется неспособной удовлетворять в полной мере спрос на энергетические ресурсы) и ее эффективностью, характеризующейся отсутствием излишних инвестиций в энергетику.

Поскольку национальная энергетическая система представляет собой сложную динамическую систему, развитие которой обусловлено как внутренними процессами в самой системе, так и экзогенными факторами управляющего воздействия на нее со стороны самостоятельных акторов, приводящими к появлению новых элементов и взаимосвязей в рамках рассматриваемой системы, появление новых элементов национальной энергетической системы может приводить как к росту уязвимости системы, так и к росту ее адаптивных свойств. Проведенное исследование позволило сформулировать ключевые принципы добавления новых элементов и

взаимосвязей в национальную энергетическую систему в процессе разработки энергетической политики, направленной на увеличение адаптивности национальной энергетической системы при росте ее сложности в условиях цифровизации и появления новых источников энергии.



## ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ АДАПТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: РОЛЬ ИНВЕСТИЦИЙ

### 4.1. Инвестиции как фактор повышения уровня адаптивности энергетических систем

Инвестиции выступают необходимым ресурсом, обеспечивающим поступательное развитие и трансформацию национальной энергетической системы, что приводит к росту ее адаптивных свойств [21, 47, 58, 59, 88, 197]. Именно благодаря инвестициям происходит модернизация и реструктуризация энергетических систем, что способствует их «подстраиванию» под новые условия функционирования и созданию финансовых и технических резервов. На основе исследования выделенных факторов, обеспечивающих адаптивные свойства энергетических систем, а также сформулированных принципов добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему были выделены следующие **основные направления положительного влияния инвестиций на адаптивные свойства энергетических систем** [95]:

1. Увеличение производственной мощности энергетической системы в целом. Создание новых производственных элементов системы при прочих равных условиях увеличивает производственный потенциал системы в целом и дает возможность покрывать больший спрос на энергоносители. Например, в электроэнергетических системах каждый новый инвестиционный проект, создающий новые генерирующие мощности, увеличивает общую мощность электрогенерирующей системы и дает возможность перераспределять выдаваемую потребителям электростанциями мощность внутри электроэнергетической сети.

Рост производственных мощностей определяет рост рыночного предложения энергетических ресурсов, что в долгосрочной перспективе является необходимым условием осуществления экономического роста, приводящего к росту спроса на энергетические ресурсы.

2. Увеличение резерва мощности. Проект капиталовложений по строительству новых производственных объектов может предполагать создание резерва мощности для покрытия скачкообразного роста спроса на энергоресурс. В этом случае суммарный запас резервной мощности всей энергетической системы, в которую входит новый промышленный объект, вырастет, увеличивая, в свою очередь, и адаптивность данной системы. Суммарный запас резервной мощности системы является важным фактором обеспечения адаптивности системы к меняющимся условиям, поскольку именно резервная мощность может быть использована в критических ситуациях:

- в случае аварии одного из производственных элементов системы;
- при выходе на новые рынки сбыта;
- при обеспечении потребностей резко растущей экономики в энергоресурсе.

3. Обновление основных фондов энергетической системы. Строительство новых производственных мощностей обновляет парк оборудования, используемого в энергетической системе в целом. Поскольку новое оборудование, как правило, более эффективно (менее затратное на единицу продукции, более экологически безопасное, поддерживает большее количество режимов работы, запускается быстрее, долговечнее и т.д.) и более адаптивно к меняющимся условиям (за счет более быстрого запуска, более компактного размера, большей безопасности и надежности в работе), то обновление основных фондов энергетической системы увеличивает ее адаптивность. Данное обстоятельство особенно актуально для России ввиду сильного устаревания основных фондов энергетических объектов.

4. Увеличение экономической эффективности функционирования энергетической системы. Чем более эффективна энергетическая система, тем более она адаптивна к меняющимся внешним условиям, поскольку, во-первых, доход от функционирования энергетической системы может являться резервом, используемым на адаптивные мероприятия, а во-вторых, высокая

экономическая эффективность привлекает новые инвестиции, которые в свою очередь будут способствовать повышению ее адаптивности.

5. Расширение рынков сбыта. В некоторых случаях крупномасштабные инвестиционные проекты могут быть связаны с выходом энергетических компаний на новые энергетические рынки. В этом случае неопределенность функционирования энергетической системы, связанная с волатильностью энергетических рынков, будет уменьшаться за счет диверсификации рынков сбыта, а адаптивность энергетической системы в целом будет увеличиваться за счет возможного ее переориентирования при определенных изменениях с одних рынков сбыта на другие.

6. Развитие инфраструктуры. Строительство новых промышленных объектов сопровождается развитием производственной инфраструктуры, которая увеличивает адаптивность энергетической системы. Данное обстоятельство особенно актуально для электроэнергетики, где строительство новой электростанции сопровождается развитием электрических сетей, которые увеличивают адаптивность электроэнергетической системы в целом за счет, с одной стороны, увеличения пропускной способности сетей, а с другой, расширения возможностей подключения новых потребителей электроэнергии к сетям.

7. Изменение доли инерционных элементов в энергетической системе. Крупномасштабные инвестиционные проекты могут изменять уровень адаптивности энергетической системы за счет изменения в структуре активов доли инерционных, немобильных элементов. Примером инерционных элементов могут быть дорогостоящие газопроводы, требующие больших постоянных затрат, но при этом ограничивающие рынки сбыта. Снижение доли инерционных элементов в структуре активов ведет к росту уровня адаптивности энергетической системы за счет уменьшения времени, требуемого для подстраивания системы к новым условиям.

На рис. 4.1 систематизированы общесистемные эффекты от реализации реальных инвестиций.



Рисунок 4.1 – Общесистемные эффекты от реализации реальных инвестиций

Источник: составлено автором

Обозначенные направления положительного влияния инвестиций на адаптивные свойства энергетических систем были выделены на основе анализа принципов добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему с целью повышения ее адаптивных свойств. На основе выделенных направлений можно предложить критерии оценки инвестиционных проектов с точки зрения эффективности их влияния на адаптивные свойства энергетической системы (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Критерии оценки инвестиций, систематизированные с точки зрения их соответствия принципам добавления новых элементов в систему с целью повышения ее адаптивных свойств

Направления влияния инвестиционного проекта на адаптивные свойства системы	Критерии оценки инвестиций
Появление новой «избыточности» в системе	
Увеличение резервов мощности; увеличение производственной мощности системы	Размер увеличения производственной мощности системы; изменения резервов
Адаптивность нового элемента системы	
Адаптивность инвестиционных проектов; увеличение экономической эффективности системы; обновление основных фондов системы	Степень износа ОПФ энергетической системы; изменения капитализации компании; адаптивность индивидуальных инвестиционных проектов
Принцип необходимого разнообразия Эшби	
Развитие инфраструктуры; расширение рынков сбыта	Отношение суммы располагаемой мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей; пропускная способность газо- и нефтепроводов; мощность заводов по сжижению газа; емкость рынков сбыта энергетических ресурсов
Снижение инерционности системы	
Снижение доли инерционности системы	Капитальные затраты на единицу установленной мощности; доля малой распределенной энергетики
Рост диверсификации	
Диверсификация энергобаланса; диверсификация поставщиков энергетических ресурсов	индекс Херфиндаля-Хиршмана для поставщиков энергетических ресурсов; показатель PDFT (Probability of different fuel type) для оценки диверсификации энергетического баланса

Источник: составлено автором

Для анализа появления новой «избыточности» в системе вследствие реализации проекта можно использовать такие показатели, как прирост производственной мощности системы ( $\Delta PC$ ) и прирост резервной мощности ( $\Delta RP$ ):

$$\Delta PC = \frac{(PC_1 - PC_0)}{PC_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\Delta RP = \frac{(RP_1 - RP_0)}{RP_0} \cdot 100 \quad (4.2)$$

где  $\Delta PC$  – прирост производственной мощности, %;

$PC_0$  и  $PC_1$  (*productive capacity*) – производственная мощность системы до и после реализации рассматриваемого проекта;

$\Delta RP$  – прирост резервной мощности, %;

$RP_0$  и  $RP_1$  (*reserve power*) – резервная мощность системы до и после реализации рассматриваемого проекта.

Для анализа адаптивности нового элемента системы, привносимого в систему посредством реализации инвестиционного проекта, можно использовать такие показатели, как коэффициент  $AE$  (*Adaptation-Efficiency*)<sup>2</sup>, изменение степени износа основных производственных фондов (ОПФ) энергетической системы, изменение капитализации компании.

Чем меньшую степень износа ОПФ предполагает рассматриваемый инвестиционный проект, тем он более привлекателен с точки зрения повышения адаптивности энергетической системы за счет снижения аварийности производства, улучшения технологических и технико-экономических показателей.

Чем сильнее повышается капитализация энергетической компании, тем больше у нее появляется возможностей для привлечения ресурсов на адаптационные мероприятия. Для определения влияния реализации крупномасштабного инвестиционного проекта на рыночную капитализацию компании предлагается использовать базовый метод фундаментального анализа, а именно метод дисконтирования будущих денежных потоков. Капитализация компании определяется по формуле:

$$C = A + \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{(1+r)^i} \quad (4.3)$$

где  $C$  – капитализация компании;

$A$  – рыночная стоимость совокупных активов компании;

$P_i$  – чистая прибыль компании в  $i$ -м периоде;

$r$  – ставка дисконтирования.

Увеличение капитализации компании в случае реализации проекта должно произойти на величину изменения второго члена приведенного выше уравнения. Таким образом:

---

<sup>2</sup> Методика расчета коэффициента приведена в следующем параграфе

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{(1+r)^i} \quad (4.4)$$

где  $\Delta C$  – ожидаемое изменение капитализации в случае реализации проекта;

$\Delta P_i$  – изменение чистой прибыли компании в  $i$ -м периоде, вызванное реализацией проекта.

В реальных условиях у разных инвесторов будут разные представления о будущих изменениях [29, 90]. Диапазон представлений о будущих изменениях будет тем уже, чем более доступной для участников фондового рынка будет информация о проекте. Степень изменения рыночной капитализации компании в результате отрицательного или положительного отношения участников фондового рынка к реализации крупномасштабного проекта можно оценить экспертным методом. Несколько экспертов, не участвующих в разработке проектных материалов, должны независимо друг от друга предоставить прогнозы изменения чистой прибыли от периода к периоду в результате реализации проекта. Подставив полученные данные в формулу, получим несколько значений ожидаемых изменений капитализации, из которых методом расчета средней можно вычислить ожидаемое изменение капитализации компании.

Степень влияния каждого конкретного инвестиционного проекта на уровень адаптивности энергетической системы зависит от интегрированности нового объекта в национальную энергетическую систему, количества затрагиваемых этапов преобразования энергии, уровня использования новых энергоэффективных технологий, масштабов осуществляемых капиталовложений и др.

Принцип необходимого разнообразия Эшби при добавлении новых элементов в систему реализуется в рамках расширения рынков сбыта и развития инфраструктуры, к которым приводит реализация инвестиционных проектов, поскольку в этом случае появляются больше разнообразных действий, доступных для системы управления, и расширяется управленческий

инструментарий энергетических компаний и государства. Оценить, насколько рассматриваемый проект соответствует данному принципу, можно с помощью таких показателей, как изменение отношения суммы располагаемой мощности электростанций к пропускной способности межсистемных связей ( $\Delta CTC$ ); пропускная способность газо- и нефтепроводов; мощность заводов по сжижению газа; емкость рынков сбыта энергетических ресурсов:

$$\Delta CTC = KTC_1 - KTC_2 = \frac{TC_1}{PC_1} \cdot 100 - \frac{TC_0}{PC_0} \cdot 100 \quad (4.5)$$

где:  $\Delta CTC$  (*coefficient of throughput capacity*) – изменение отношения суммы располагаемой мощности электростанций и пропускной способности межсистемных связей;

$PC_0$  и  $PC_1$  (*productive capacity*) – производственная мощность системы до и после реализации рассматриваемого проекта;

$TC_0$  и  $TC_1$  – пропускная способность межсистемных связей до и после реализации рассматриваемого проекта.

Инерционность энергетической системы среди прочего определяется уровнем затрат на приращение дополнительных производственных мощностей (MI) и долей малой распределенной генерации в структуре генерирующих мощностей (DG).

Рост уровня диверсификации энергетической системы в результате реализации инвестиций можно оценить с помощью таких показателей, как индекс Херфиндаля-Хиршмана ( $HHI$ ) (для поставщиков энергетических ресурсов); показатель  $PDFT$  (*Probability of different fuel type*) (для оценки диверсификации энергетического баланса):

$$HHI = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (4.6)$$

где  $p_i$  – доля поставок энергоресурса  $i$ -м поставщиком, в долях единицы.

$$PDFT = 1 - \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (4.7)$$

где  $N$  – количество видов энергоресурсов, используемых в экономике для генерации электроэнергии;



$S$  – доля суммарной мощности электростанций, использующих  $i$ -й вид энергоресурса, в общей мощности электростанций, используемых в экономике.

Для анализа механизма влияния инвестиций на уровень адаптивности энергетических систем необходимо различать общий поток совокупных инвестиций в ТЭК и отдельные крупномасштабные инвестиционные проекты.

К крупномасштабным относятся инвестиционные проекты со следующими характерными особенностями: значительность объемов инвестирования и длительность сроков реализации; значительное влияние на финансово-экономическое состояние компании-реализатора и на ее рыночную капитализацию; высокая социальная, политическая и экономическая значимость для отрасли, региона и страны в целом; наличие эффекта обратной связи. Применительно к ТЭК к этим особенностям добавляются: значительное влияние на экологию и высокая неопределенность цен на энергоносители, обусловленная либерализацией рынков и усилением внешнеэкономических связей.

На рис. 4.2 представлены отличительные особенности крупномасштабных инвестиционных проектов в ТЭК.

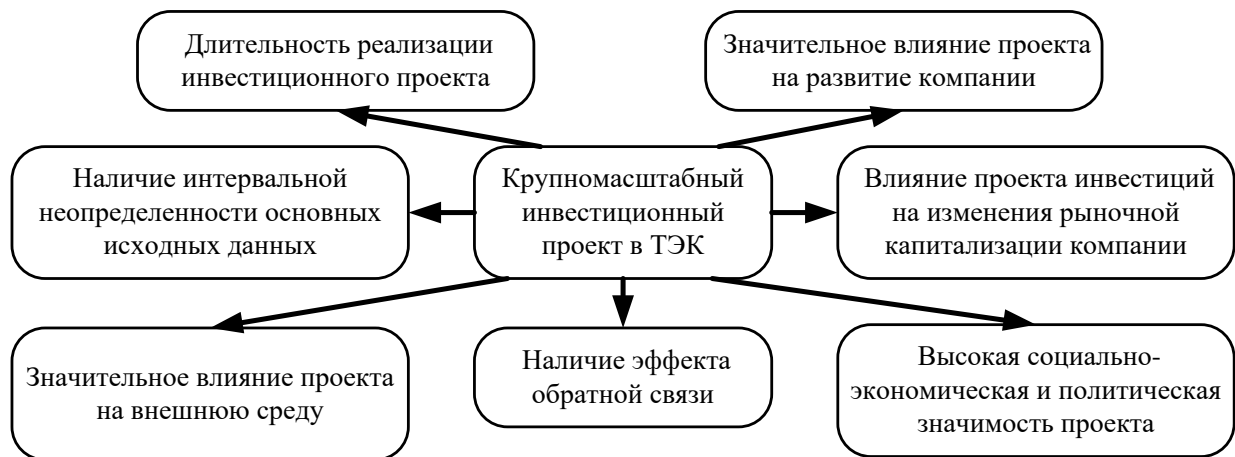


Рисунок 4.2 – Отличительные особенности крупномасштабных инвестиционных проектов в ТЭК

Источник: [101]

**Длительность реализации инвестиционного проекта.** Инвестирование в ТЭК является стратегическим, долгосрочным вложением средств, при котором временной интервал, разделяющий время начала реализации проекта до времени запуска основного производства, является значительным. Это накладывает определенные трудности на процесс прогнозирования будущих макроэкономических и технико-экономических показателей. Возникает проблема выбора оптимального времени запуска проекта.

Длительность сроков реализации проектов создает большие трудности в прогнозировании будущих основных технико-экономических показателей, таких как спрос и цена на энергоносители, что объясняется сложностью самой процедуры прогнозирования.

**Значительное влияние проекта на развитие энергетических компаний.** Инвестиционная деятельность, являясь средством для достижения поставленных целей организации, должна рассматриваться в контексте развития компании. Инвестиционный проект, а также финансово-экономическое положение любой компании могут быть оценены с позиции соотношения риска и дохода. Реализация инвестиций со свойственным им уровнем риска и доходности оказывает непосредственное влияние на уровень риска и доходности деятельности самой компании в целом. Механизм влияния инвестиционного проекта на финансово-экономическое состояние компании следующий. Компания, осуществляющая капиталовложения, принимает на себя уровень риска, присущий проекту, а также получает дополнительный доход от инвестиций. Если совокупный риск предприятия и его общая доходность до реализации проекта отличны от уровня риска и дохода инвестиций, то после реализации подобных инвестиций совокупный уровень риска и доходности компании должен измениться.

**Влияние проекта инвестиций на изменение рыночной капитализации компании.** Как следствие влияния проекта капиталовложений на финансово-экономическое положение компании можно наблюдать изменения ее рыночной капитализации.

Финансовый рынок чувствителен к информации, касающейся эмитентов, в особенности к информации о том, что та или иная компания, акции которой обращаются на фондовом рынке, приняла решения о реализации того или иного крупномасштабного проекта. В конечном итоге деятельность компаний направлена на увеличение благосостояния акционеров, которое формируется из двух источников: увеличение стоимости акций и получаемой прибыли. Таким образом, в случае оценки рискованности крупномасштабных проектов необходимо проведение анализа того, как скажется на капитализации компании решение о реализации крупномасштабного проекта. Данная задача усложняется тем обстоятельством, что влияние проекта на капитализацию компании не является одномоментным. Так первоначальная реакция рынка на новость о принятии того или иного проекта к реализации происходит быстро. Однако в процессе фактической реализации проекта участники фондового рынка будут переоценивать значение проекта. Таким образом, происходит мультипликация рисков: если проект принесет меньше прибыли, чем ожидалось, то инвестор потеряет не только от понижения дохода, генерируемого проектом, но и от снижения капитализации; если проект окажется более эффективным, то рынок отреагирует еще большим увеличением спроса, а значит и цены на акции.

**Высокая социальная, экономическая и политическая значимость проекта.** Высокая значимость крупномасштабных проектов приводит к тому, что в процессе определения эффективности инвестиций увеличивается роль способов оценки политических, социальных и экономических рисков. Так сонаправленность проекта зарождающимся и реально существующим экономическим, политическим и социальным тенденциям способна усилить положительный эффект от его осуществления. Реализация инвестиционного проекта, не согласующегося с настоящими и будущими тенденциями, приведет скорее к ухудшению положения компании, чем к получению дополнительных выгод. В качестве примера можно привести ситуацию с нефтепроводом «Восточная Сибирь — Тихий Океан» НК «Транснефть». Первоначальный вариант предусматривал прокладку нефтепровода в 800 м от Байкала, что

угрожало его экологической безопасности. Однако сопротивление общественности и экологов привело к удалению нефтепровода на 350–400 км от крупнейшего на планете пресноводного озера. В данной ситуации экологический риск реализовался в необходимости увеличить длину нефтепровода на 1920 км, что, разумеется, связано с дополнительными затратами, которые можно было бы учесть, уделив должное внимание оценке экологической и социально-экономической значимости данного проекта.

Таким образом, оценивая риски капиталовложений, недопустимым представляется пренебрежение фундаментальным свойством крупномасштабных проектов усиливать напряжения в экономической и социальной среде. Поэтому в систему общего анализа эффективности проекта необходимо включение оценки его соответствия общеэкономическим и социальным тенденциям развития страны.

**Наличие эффекта обратной связи.** Принимая решение о финансировании какого-либо проекта, инвестор в первую очередь ориентируется на денежный поток, потенциально генерируемый проектом. Интенсивность этого потока будет зависеть от цен на продукцию (товары, услуги), получаемую вследствие функционирования объекта инвестирования. Соответственно, инвестор или лицо, принимающее решение, анализирует ситуацию на интересующем рынке, оценивает перспективы изменения цен как на сырье, так и на конечную продукцию и принимает решение об инвестировании. Однако реализация крупномасштабного проекта может значительно повлиять на соотношение спроса и предложения на рынке, что в конечном итоге приведет к изменению цен. Таким образом, здесь не действует принцип классической экономической школы, заключающийся в том, что один производитель не влияет на равновесную цену, поскольку одним участником выбрасывается на рынок значительный объем продукции. Присутствие свойства обратной связи приводит к уменьшению стабильности цены, например, при увеличении выпуска продукции. Наглядным примером может служить реализация одного из вариантов использования Ковыктинского газоконденсатного месторождения,

расположенного на севере Иркутской области. Природный газ этого месторождения содержит относительно большую долю гелия (порядка 0,25%). Одним из вариантов использования данного месторождения является выделение из состава природного газа гелия и его реализация на мировом рынке. Однако объемы получаемого гелия будут столь значительны (40% мирового потребления), что это неминуемо повлияет на уровень его цены. Крупномасштабные проекты в ТЭК оказывают влияние на энергетические рынки, а также через систему обратных связей на экономику в целом.

**Наличие интервальной неопределенности основных исходных данных.**

Крупномасштабные инвестиционные проекты в ТЭК характеризуются высокой неопределенностью исходных данных. Данное обстоятельство обусловлено следующими причинами:

- крупномасштабные проекты в ТЭК являются долгосрочными, что приводит к необходимости прогнозировать изменения социально-экономических показателей на отдаленное будущее;
- при оценке последствий реализации крупномасштабных проектов трудно спрогнозировать реакцию внешней среды (эффект обратной связи). Реализация крупномасштабного проекта приводит к изменению конъюнктуры рынка, а значит может привести к изменению основных экономических показателей;
- сложность использования статистического метода для получения распределений вероятностей переменных, ввиду уникальности, которой обладает каждый крупномасштабный проект в ТЭК;
- мировые энергетические рынки характеризуются высокой нестабильностью конъюнктуры, что оказывает сильное влияние на цены в ТЭК России, значительная часть продукции которой экспортируется.

В результате высокой неопределенности для ряда факторов (например, для цены на энергоносители, для объема спроса и т.д.) очень сложно получить достоверные распределения вероятностей. В то же время возможен прогноз интервалов будущих значений той или иной переменной, вероятность

попадания в который стремится к единице. Данный вид неопределенности называется «интервальной неопределенностью». «В общем же случае мы говорим об интервальной неопределенности, если об эффекте проекта известно только некоторое (дискретное, образованное одним или несколькими интервалами или какое-то иное) множество его возможных значений, но не распределение вероятностей на этом множестве» [29, с. 471].

Интервальная неопределенность создает сложности в использовании традиционных методов оценки и учета риска при анализе эффективности инвестиций, использующих заданные распределения вероятностей. Задавать распределения вероятности в условиях крайней неопределенности исходных данных представляется нецелесообразным, поскольку любые предположения о характере распределения вероятностей в таких условиях являются необоснованными, а значит необоснованным будет анализ рискованности, основанный на оценке такого распределения.

Анализ особенностей крупномасштабных проектов капиталовложений в энергетике позволяет говорить о значительном их влиянии на долгосрочную адаптивность национальной энергетической системы. С одной стороны, крупномасштабный инвестиционный проект оказывает влияние на уровень адаптивности национальной системы как ее неотъемлемый элемент, который в случае некоторых изменений социально-экономических факторов может выступить в роли стабилизирующего элемента посредством увеличения поставок энергетических ресурсов, перенаправления поставок топлива и др. С другой стороны, уровень адаптивности самого крупномасштабного проекта повышает уровень адаптивности всей национальной энергетической системы.

Значимые технико-экономические параметры влияния общего потока инвестиций и крупномасштабных инвестиционных проектов на адаптивные свойства энергетической системы отличаются. Для общего потока инвестиций можно выделить следующие параметры, которые необходимо рассматривать при анализе состояния дел в ТЭК:

1. Объем инвестиций. Совокупный объем инвестиций, необходимый для поддержания текущего уровня адаптивных свойств энергетической системы, должен быть достаточен для замены морально и физически устаревшего оборудования. Данный параметр зависит от многих показателей (норма прибыли в экономике в целом и в ТЭК в частности; уровень рисков предпринимательской деятельности; волатильность на финансовых рынках; стабильность политической системы и др.), которые в совокупности характеризуют инвестиционную привлекательность ТЭК страны.

2. Основные направления инвестирования. Центральное значение имеют не отдельные инвестиционные проекты, а общие тренды инвестиционной политики инвесторов в ТЭК (увеличивается или уменьшается доля инерционных объектов; инвестируются ли средства в разработку новых месторождений; с опережающими ли темпами развивается инфраструктура ТЭК и т.д.).

3. Уровень диверсификации инвесторов. В случае если источники финансирования инвестиционных проектов в достаточной мере диверсифицированы, то есть через институт финансового рынка инвестировать могут и желают мелкие инвесторы, иностранные инвесторы, правительство страны, крупные отечественные инвесторы (включая институциональных инвесторов), а также сами энергетические компании, создается ситуация, когда инвестиционный поток становится достаточно устойчивым к стрессовым событиям. Когда же основным источником финансирования выступает государство или немногочисленные крупные корпорации, инвестиционный поток становится чувствительным к рискам разной природы.

4. Динамика развития сопряженных ТЭК отраслей. Для динамичного развития энергетических систем, создания гибких и адаптивных управленческих структур необходимо, чтобы в рамках национальной экономики развивались сопряженные ТЭК отрасли, то есть те отрасли, которые являются источником трудовых и материальных ресурсов для компаний энергетического сектора. В условиях глобализации и интеграции национальных

компаний с зарубежными контрагентами значимость данного параметра снижается. Однако в условиях роста геополитической напряженности и введения международных санкций, когда отечественным энергетическим компаниям закрывается доступ к технологическим разработкам и международному экономическому сотрудничеству, данный фактор опять становится актуальным.

Исходя из особенностей крупномасштабных инвестиционных проектов, можно выделить следующие параметры, которые необходимо рассматривать при анализе их влияния на адаптивные свойства энергетической системы.

1. Уровень эффективности проекта. Эффективные крупномасштабные проекты создают условия и технологический плацдарм для реализации других инвестиционных проектов. То есть реализация технологически и экономически эффективного проекта повышает инвестиционную привлекательность ТЭК в целом, тем самым оказывая положительное воздействие на адаптивные свойства энергетической системы.

2. Адаптивность инвестиционного проекта. Уровень адаптивности крупномасштабного проекта капиталовложений в ТЭК представляет собой его способность оставаться экономически эффективным и выполнять свои функции по поставкам энергетических ресурсов потребителям в условиях неблагоприятных изменений. В случае если проект адаптивен, снижаются риски приостановки проекта в случае ухудшения внешних условий, повышается вероятность привлечения дополнительных финансовых ресурсов в случае необходимости и т.д.

3. Изменение производственного и транспортного потенциала системы, в рамках которой реализуется крупномасштабный инвестиционный проект.

4. Геополитическая и социальная значимость проекта. Геополитически и социально значимые проекты увеличивают адаптивность системы за счет расширения сетей взаимодействия в результате установления новых внешних и внутренних связей энергетических компаний, задействованных в реализации



проекта, с международными контрагентами, компаниями смежных ТЭК отраслей, новыми высококвалифицированными работниками и т.д.

#### 4.2. Свойство адаптивности инвестиционных проектов в ТЭК

Исследование свойства адаптивности сложных динамических систем с применением инструментов маржинального анализа, используемых при принятии управленческих решений, позволило выявить и описать свойство адаптивности инвестиционных проектов в ТЭК в контексте влияния реализации отдельных крупномасштабных проектов капиталовложений на адаптивные свойства энергетических систем [105].

Уровень адаптивности инвестиционного проекта в ТЭК определяется его способностью за счет привлечения дополнительных затрат сохранять свою экономическую эффективность в случае реализации стрессового события в виде неблагоприятного изменения некоторого фактора  $x$ . При этом можно выделить следующую функциональную зависимость, отражающую взаимосвязь чистого дисконтированного дохода ( $NPV$ ), изменения некоторого фактора ( $\Delta x$ ), приводящего к снижению  $NPV$ , и дополнительных затрат на адаптацию ( $C$ ):

$$\begin{aligned} \Delta NPV &= f(\Delta x, C) & (4.8) \\ \Delta x &\rightarrow \max \\ C &\rightarrow \max \\ \Delta NPV &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

При росте неблагоприятного изменения фактора  $x$  для сохранения планового уровня  $NPV$  затраты на адаптацию также будут расти. Однако нужно отметить, что инвестиционные проекты имеют пределы адаптации, когда дальнейшее изменение фактора  $x$ , приводящее к снижению  $NPV$ , не может быть компенсировано дополнительными затратами. Данное обстоятельство объясняется характером зависимости  $NPV$  от изменения фактора  $x$  и от роста дополнительных затрат (рис. 4.3 и рис. 4.4).

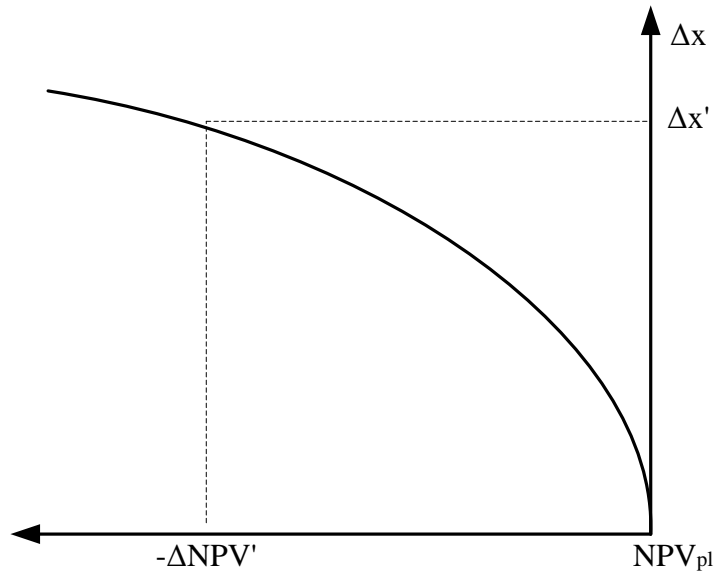


Рисунок 4.3 – Зависимость значения  $NPV$  проекта от изменения фактора  $x$

Источник: составлено автором

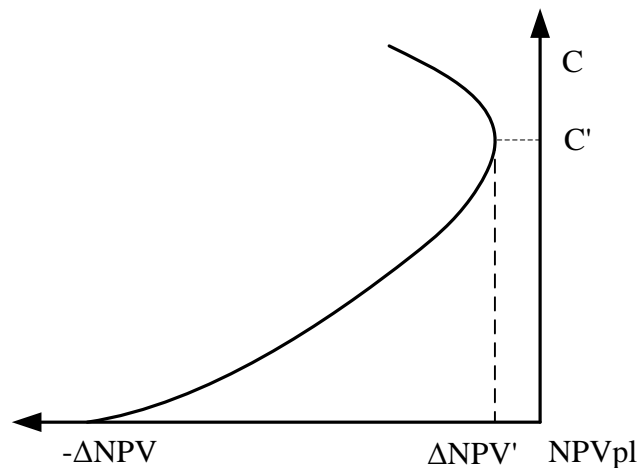


Рисунок 4.4 – Зависимость значения  $NPV$  проекта от дополнительных затрат на адаптацию

Источник: составлено автором

Увеличение дополнительных расходов на адаптацию к изменению фактора  $x$  может достигать уровня  $C'$ , когда прирост дополнительных затрат будет сопровождаться уменьшением прироста  $NPV$ :

$$\frac{C}{\Delta NPV} = \begin{cases} > 1, & C > C' \\ \leq 1, & C \leq C' \end{cases} \quad (4.9)$$

Эффективность затрат на адаптацию при заданном изменении фактора  $x$  составляет:

$$EAC = \frac{C}{\Delta NPV_x} \quad (4.10)$$

где  $\Delta NPV_x$  – прирост чистого дисконтированного дохода, вызванный осуществленными адаптационными затратами.

Чем ниже показатель  $EAC$  (*Efficiency-of-Adaptation-Costs*), тем эффективнее затраты на адаптацию. Причем затраты на адаптацию инвестиционного проекта будут эффективны в случае соблюдения неравенства:

$$0 \leq \frac{C}{\Delta NPV_x} \leq 1 \quad (4.11)$$

В то же время размер адаптационных затрат  $C$  зависит не только от степени неблагоприятного изменения фактора  $x$ , но и от времени данного изменения. Чем на более позднем этапе проявляется неблагоприятное событие, тем сложнее за счет адаптационных затрат выйти на уровень проектной эффективности.

Степень адаптивности инвестиционного проекта может быть охарактеризована коэффициентом  $AE$  (*Adaptation-Efficiency*), рассчитываемым с использованием показателя  $VaR$  (*Value-at-Risk*):

$$AE = \frac{C}{VaR} \quad (4.12)$$

Коэффициент  $AE$  отражает уровень дополнительных затрат по отношению к показателю максимальных убытков  $VaR$ , которые будут эффективны с точки зрения восстановления планового уровня  $NPV$ . Чем выше показатель  $AE$ , тем выше адаптивность проекта, поскольку тем больший у проекта потенциал к «подстраиванию» под изменение внешних условий. Коэффициент  $AE$  дает концептуальное представление об адаптивных свойствах инвестиционных проектов, и помогает сформировать стратегию принятия управленческих решений, направленных на снижение рисков капиталовложений.

Показатель максимальных убытков  $VaR$  характеризует максимальную ожидаемую потерю в течение заданного периода времени с заданным уровнем вероятности, принимаемым обычно 0,95 или 0,98. В условиях высокой неопределенности исходных данных и многофакторности инвестиционных проектов в ТЭК для нахождения значения  $VaR$  можно использовать следующий способ, состоящий из трех этапов.

На первом этапе методом Монте-Карло имитируются отклонения значений основных технико-экономических факторов от плановых уровней и определяется отклонение значения результирующего инвестиционного показателя  $NPV$  (рис. 4.5). Таким способом осуществляется цикл повторений [271].

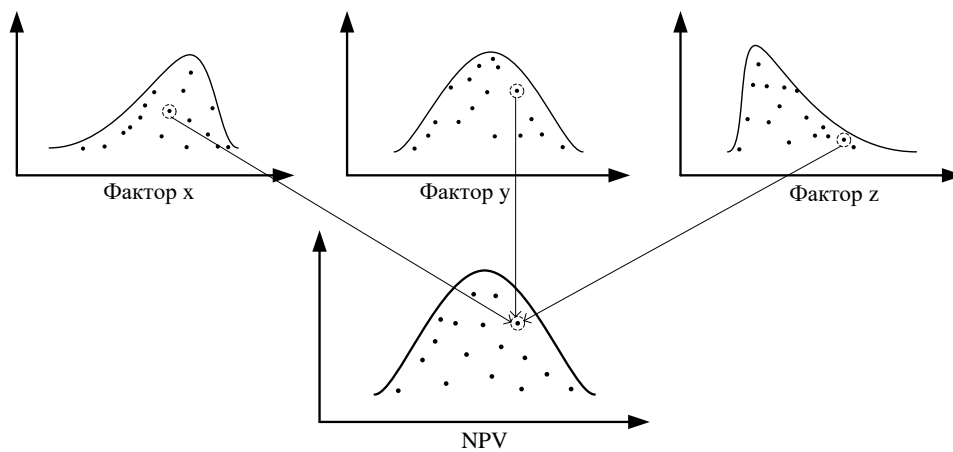


Рисунок 4.5 – Схема использования метода Монте-Карло для нахождения отклонения значения результирующего инвестиционного показателя  $NPV$

Источник: составлено автором

На втором этапе на основе анализа полученного множества значений строится распределение вероятности возможных значений  $NPV$  (рис. 4.6).

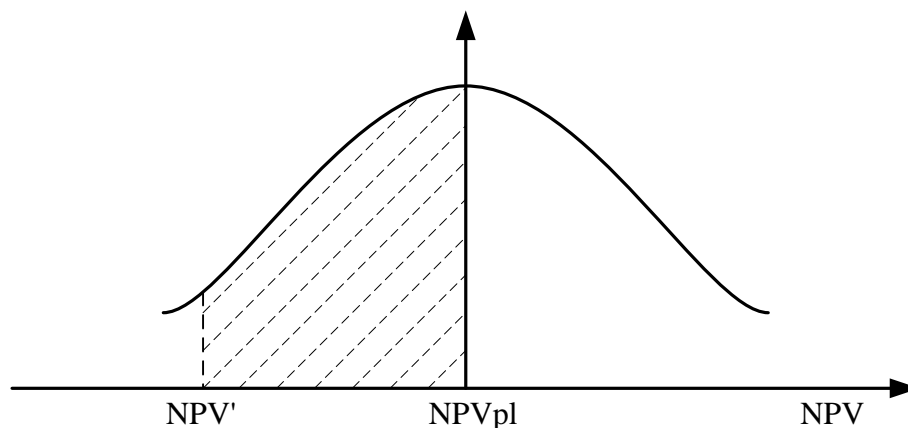


Рисунок 4.6 – Распределение вероятности возможных значений  $NPV$

Источник: составлено автором

На рис. 4.6 все возможные потери отражаются левее оси ординат и принимаются за 100%. Значение  $-NPV'$  соответствует максимальному снижению чистого дисконтированного дохода инвестиционного проекта с уровнем достоверности 95%.

На третьем этапе на основе полученного распределения значений  $NPV$  находится значение показателя  $VaR$ .

Для инвестиционных проектов в энергетике, связанных с добычей, переработкой и транспортом энергетических ресурсов, одним из ключевых параметров, определяющих экономическую эффективность ( $NPV_{pl}$ ), является величина цены на энергоресурс. Поскольку инвестиционный горизонт для проектов в энергетике составляет, как правило, 20-25 лет, а по вариантам строительства ГЭС и АЭС – еще больше, цены задаются изменяющимся во времени интервалом ожидаемых значений, который используется при оценке экономической эффективности капиталовложений.

В условиях растущей неопределенности и волатильности энергетических рынков, усложнения социально-политических и экономических взаимоотношений между странами, ускорения темпов научно-технического прогресса, напрямую оказывающего влияние на развитие энергетики, для повышения обоснованности принятия инвестиционных решений в энергетике

становится целесообразным при расчете экономической эффективности капиталовложений учитывать не только ожидаемые минимальные и максимальные цены на энергоносители, но и предельно возможные их значения. Прогноз коридора ожидаемых цен на энергоресурсы, осуществляемый такими организациями, компаниями и институтами, как Международное энергетическое агентство, ВР, Институт энергетических исследований РАН, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, основывается на прогнозе развития мировой экономики с привязкой к спросу и предложению на энергоресурсы (этапы процесса прогнозирования представлены на рис. 4.7).

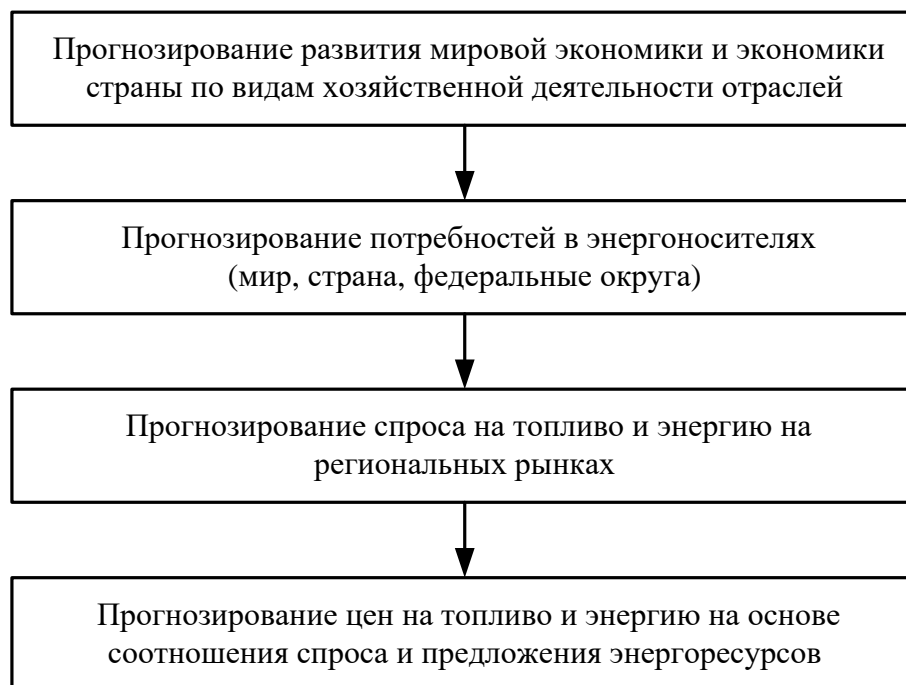


Рисунок 4.7 – Этапы процесса прогнозирования цен на энергоресурсы

Источник: составлено автором

Предельные цены, в отличие от ожидаемых цен, определяются не на основе соотношения спроса и предложения, а на основе экономических возможностей производителей и потребителей энергии совершать сделки по купле-продаже энергетических ресурсов. Так максимальная предельная цена обуславливается возможностями экономики региона, страны или группы стран оплачивать энергоресурсы, поскольку при достижении ценой энергоресурса

определенного предельного значения потребителя энергии, являющиеся в свою очередь производителями потребительских и инвестиционных товаров, перестанут получать приемлемый уровень прибыли. Минимальное предельное значение цены на энергоресурсы определяется уровнем затрат и нормой приемлемой доходности энергетических компаний. Соотношение предельных и прогнозируемых цен отражено на рис. 4.8.

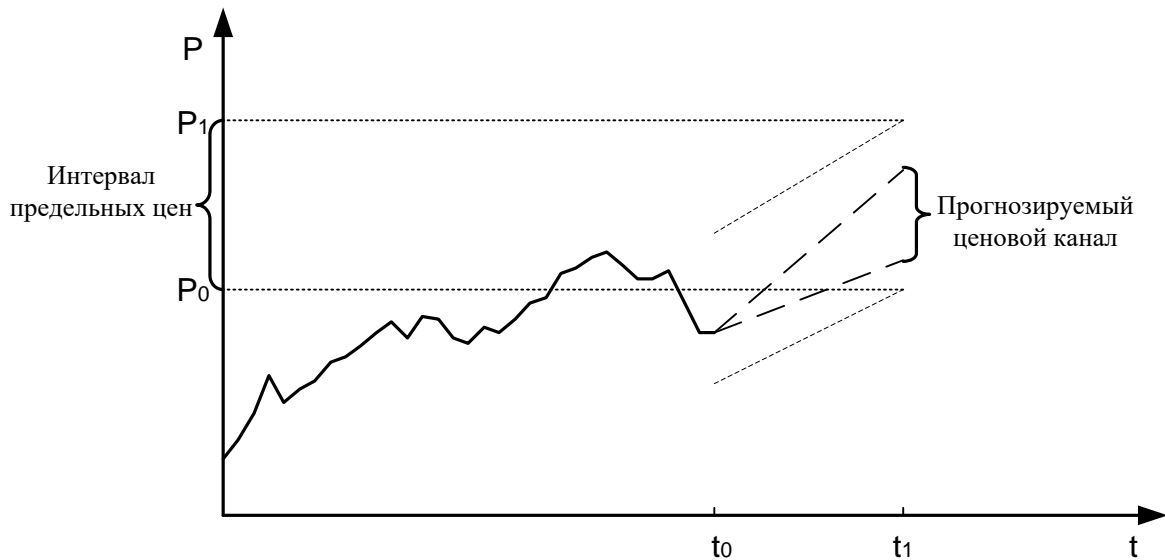


Рисунок 4.8 – Соотношение предельных и прогнозируемых цен на энергоресурсы

Источник: составлено автором

Предельные значения цены можно определить не только экспертным способом, но и используя макроэкономическое моделирование взаимосвязей экономики и энергетики [43, 68, 85, 115, 118, 181]. Достоинством данного способа является достаточно высокая обоснованность прогноза. Недостатком же является высокая затратность, которая не всегда оправдывает точность. Кроме того, использование макроэкономического моделирования взаимосвязей экономики и энергетики становится малоэффективно в условиях высокой политической нестабильности и неопределенности (так, например, введенное политическим решением эмбарго на вывоз энергоресурсов из некоторых стран или военные действия в регионе добычи энергоресурсов, могут привести к

значительному изменению текущих цен), а также в условиях активных исследований в области развития технологий добычи и переработки энергоресурсов (например, новые технологии добычи природного газа из газогидратных месторождений могут значительно увеличить предложение природного газа на рынке и понизить его цену) [7, 26, 41].

Возвращаясь к рассматриваемой проблеме оценки эффективности инвестиционных проектов в энергетике с учетом предельных цен на энергоносители, отметим, что если технико-экономические показатели (такие, как цены на реализуемую продукцию) задаются интервалами значений, тогда при расчетах получают два значения  $NPV$ : максимальный, получаемый при наиболее благоприятных с точки зрения инвесторов условиях развития ситуации, и минимальный, получаемый при наиболее неблагоприятных условиях развития ситуации. Для получения дискретного значения, которым и будет характеризоваться проект, применяются два способа. Первый способ используется, если может быть задано распределение вероятностей  $NPV$  внутри полученного интервала:

$$NPV = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} xf(x)dx \quad (4.13)$$

где  $x$  – значение  $NPV$  внутри интервала;

$f(x)$  – функция распределения вероятности  $NPV$  на интервале  $[NPV_{\min}, NPV_{\max}]$ .

Причем распределение вероятности может быть задано как с помощью экспертного заключения, так и с помощью, например, метода Монте-Карло.

Второй способ используется, когда не задается распределение вероятностей значений  $NPV$ , и основывается на формуле Гурвица, позволяющей с помощью параметра  $\lambda$  в процессе принятия решения находить промежуточный вариант между крайним оптимизмом и крайним пессимизмом лица, принимающего решение:

$$NPV = NPV_{\max} \cdot \lambda + NPV_{\min} \cdot (1 - \lambda) \quad (4.14)$$



где  $\lambda$  – коэффициент оптимизма-пессимизма, обычно принимаемый равным 0,3;

$NPV_{min}$ ,  $NPV_{max}$  – минимальное и максимальное значение показателя чистого дисконтированного дохода проекта.

При использовании в анализе не только прогнозируемых цен, но и их предельно допустимых значений, возможны три варианта положения проекта. В первом случае все возможные цены на энергоноситель приводят к получению положительного экономического эффекта, то есть во всех случаях  $NPV$  больше 0. На рис. 4.9 изображен наиболее предпочтительный вариант с точки зрения устойчивости и рискованности проекта.

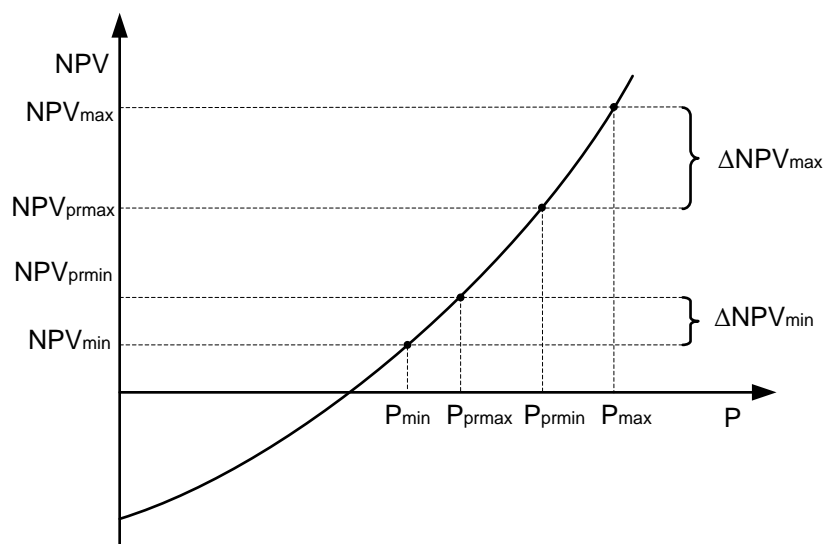


Рисунок 4.9 – Зависимость  $NPV$  проекта от уровня цены на энергоресурс (вариант 1)

Источник: составлено автором

На рис. 4.9. используются следующие обозначения:  $P_{prmin}$ ,  $P_{prmax}$  – минимальная и максимальная ожидаемая цена на энергоресурс соответственно;  $P_{min}$ ,  $P_{max}$  – минимальная и максимальная предельные цены на энергоресурс соответственно;  $NPV_{prmin}$ ,  $NPV_{prmax}$  – значения  $NPV$  проекта, получаемые при минимальных и максимальных ожидаемых ценах соответственно;

$NPV_{min}$ ,  $NPV_{max}$  – значения  $NPV$  проекта, получаемые при минимальной и максимальной предельных ценах на энергоресурс соответственно.

Во втором случае  $NPV$  меньше 0 при приближении цены на энергоносители к минимально возможным значениям (рис. 4.10).

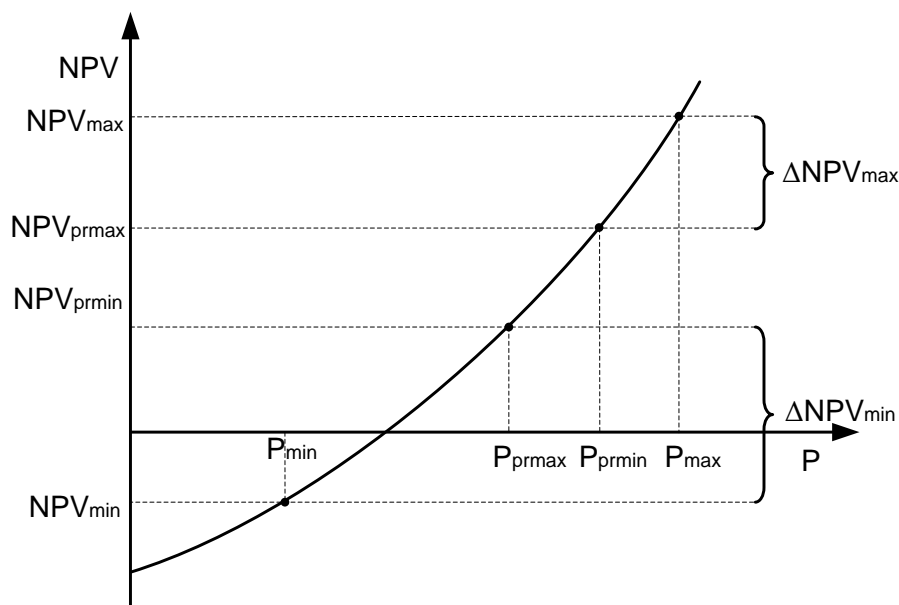


Рисунок 4.10 – Зависимость  $NPV$  проекта от уровня цены на энергоресурс (вариант 2)

Источник: составлено автором

В третьей ситуации  $NPV$  может быть отрицательным уже при достижении минимальной ожидаемой цены (рис. 4.11). В этом случае проект отвергается как рискованный или принимается, если, во-первых, инвестор идет на повышенный риск вложений, во-вторых, ожидаемый  $NPV$  проекта все же больше 0.

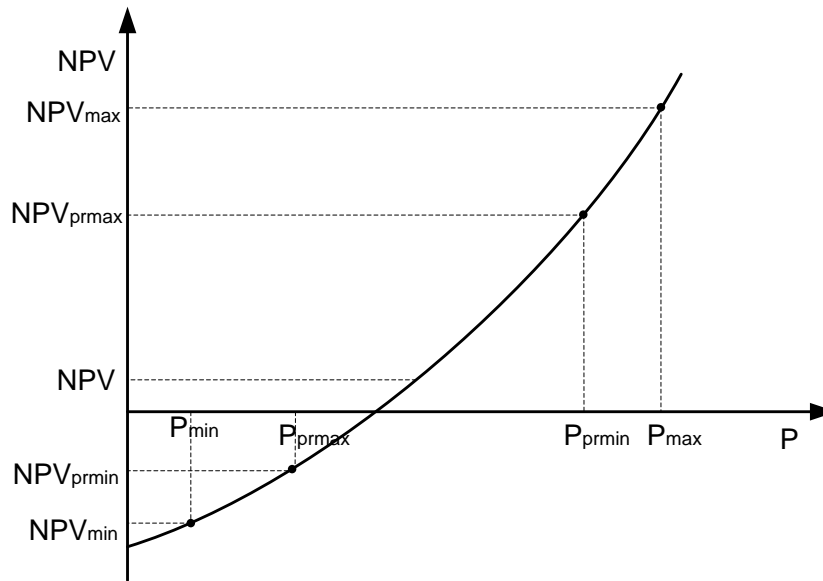


Рисунок 4.11 – Зависимость  $NPV$  проекта от уровня цены на энергоресурс (вариант 3)

Источник: составлено автором

Для учета предельных цен на энергоносители при анализе эффективности инвестиционных проектов в энергетике предлагается использовать следующий метод [102]:

$$NPV_{pl} = NPV_g + \Delta NPV_{\max} \cdot p_1 + \Delta NPV_{\min} \cdot p_2 \quad (4.15)$$

$$NPV_g = NPV_{pr\max} \cdot \lambda + NPV_{pr\min} \cdot (1 - \lambda) \quad (4.16)$$

$$\Delta NPV_{\max} = NPV_{\max} - NPV_{pr\max} \quad (4.17)$$

$$\Delta NPV_{\min} = NPV_{pr\min} - NPV_{\min} \quad (4.18)$$

где  $NPV_g$  – чистый дисконтированный доход, рассчитанный на интервале прогнозируемых цен;

$\lambda$  – коэффициент оптимизма-пессимизма, обычно принимаемый равным 0,3;

$p_1, p_2$  – вероятности попадания значения  $NPV$  в зону между  $[NPV_{pr\max}; NPV_{\max}]$ ,  $[NPV_{\min}; NPV_{pr\min}]$  соответственно.

Если  $NPV$ , рассчитанный предлагаемым методом, больше 0, тогда проект признается экономически эффективным. С помощью предлагаемого алгоритма

можно сравнивать экономическую эффективность двух и более вариантов капиталовложений.

Для расчета конечного инвестиционного показателя  $NPV_{pl}$  в предлагаемом методе комбинируется использование интервальной и вероятностной неопределенности. Интервальная неопределенность некоторого показателя предполагает заданный интервал его возможных значений – от минимума до максимума – без вероятностных его будущих значений, то есть предполагается равновероятным любое значение внутри интервала. В нашем случае интервальная неопределенность характеризует значение  $NPV$  на интервале  $[NPV_{min}; NPV_{max}]$ , поскольку ввиду большой волатильности цен на энергоносители сложно получить объективные оценки распределения вероятности. Для нахождения точечного значения показателя чистого дисконтированного дохода используется формула Гурвица, приведенная выше.

В процессе анализа задается вероятность попадания  $NPV$  в интервалы  $[NPV_{prmax}; NPV_{max}]$ ,  $[NPV_{min}; NPV_{prmin}]$ . Оценка вероятностей осуществляется экспертами с учетом социально-политических, научных и экономических тенденций.

Предлагаемый метод позволяет повысить обоснованность принимаемых инвестиционных решений в энергетике за счет учета возможного колебания рыночной цены на энергоресурсы в их предельных значениях, вполне вероятного в современных условиях политической и экономической нестабильности и неопределенности.

Для апробации предложенного варианта расчета  $NPV_{pl}$  с учетом предельных цен на энергетический ресурс рассмотрим один из вариантов использования Ковыктинского газоконденсатного месторождения. В настоящее время планируется освоение огромных запасов природного газа Восточной Сибири с целью обеспечения внутренних потребностей страны, а также для удовлетворения внешнего спроса. Важную роль в этом процессе должна сыграть разработка Ковыктинского газоконденсатного месторождения.

Ковыктинское месторождение, открытое в 1987 г., находится в 450 км. северо-восточнее г. Иркутска и в 250 км. западнее озера Байкал, занимая площадь в 7,5 тыс. км<sup>2</sup> на территории Жигаловского и Казачинско-Ленского районов [177]. Основные характеристики Ковыктинского месторождения представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Основные характеристики Ковыктинского газоконденсатного месторождения

Площадь месторождения	7 499,5 км <sup>2</sup>
Глубина залегания (по вертикали)	2838 – 3388 м.
Толщина продуктивного пласта	до 78 м.
Эффективная толщина	до 29 м.
Пластовое давление	25,7 МПа
Пластовая температура	55 °С
Содержание конденсата	67 г/м <sup>3</sup>
Содержание СН <sub>4</sub> в газе	90,3 моль %
Запасы категории С <sub>1</sub> +С <sub>2</sub> принятые на баланс ЦКЗ МПР РФ	2,7 трлн. м <sup>3</sup>

Источник: составлено автором по [183, с. 64]

Ковыктинское месторождение принадлежит к числу крупнейших газоконденсатных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока (табл. 4.3). Его разведанные запасы позволяют добывать более 30 млрд м<sup>3</sup> газа в год.

Таблица 4.3 – Состав природного газа основных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока

Месторождения	Запасы, млрд м <sup>3</sup> (С <sub>1</sub> +С <sub>2</sub> )	Состав газа, %				
		метан	этан	пропан	бутан	гелий
Ковыктинское ГК	2700	90,3	4,5	1,1	0,5	0,24
Верхнечонское НГК	95,5	83,1	5,8	2,1	1,0	0,5
Юрубчено-Тохомское НГК	414,9	79,8	7,2	2,3	1,3	0,09
Оморинское ГК	8,8	77,1	7,5	3,3	1,4	0,09
Чаяндинское НГК	1240,9	85,1	4,7	2,0	0,7	0,5
Талаканское НГК	54,1	85,9	5,6	2,0	1,0	0,5
Среднеботуобинское НГК	170,5	87,0	3,7	1,3	0,4	0,5
Дулисьминское НГ	68,4	78,3	7,8	4,0	2,2	0,3
Сахалинский шельф (в среднем)	1196,8	91,8	4,3	1,4	0,3	-

Источник: [158, с. 69]

Возможны различные варианты использования Ковыктинского газоконденсатного месторождения. В 2011 г. лицензию на разработку месторождения получило ПАО «Газпром». В настоящее время компания производит опытно-промышленную эксплуатацию месторождения, установив 7 скважин. В ближайшее время компания планирует бурение еще 24 скважин. В стратегических планах, по данным пресс-службы компании, запуск 514 эксплуатационных газовых скважин, которые позволят добывать до 25 млрд м<sup>3</sup> газа в год с выходом на проектную мощность к 2033 г. Для транспортировки газа планируется строительства участка газопровода «Сила Сибири» от Ковыктинского до Чайнинского месторождений протяженностью около 800 км.

Одним из дополнительных вариантов использования Ковыктинского месторождения наряду с добычей и переработкой природного газа является вариант сооружения экспортной ТЭС с ежегодной поставкой до 30–35 млрд кВтч электроэнергии в Китай [46, 139, 145]. Альтернативные варианты сооружения экспортных электростанций рассмотрены в работе Смирнова К.С. [176]. Расширение присутствия России на международных энергетических рынках предполагает экспорт электроэнергии в Китай, который формирует 25% спроса на энергоносители в Евразии. Китай, являясь лидером в росте среднегодового потребления электроэнергии, заинтересован в ее дополнительном получении для обеспечения своего экономического развития. Экспорт электроэнергии в Китай оправдан с позиций обеспечения энергетической безопасности России по следующим причинам:

- экспортоориентированные электрогенерирующие мощности могут выступать в роли стратегического резерва;
- в случае низкого спроса со стороны Китая электроэнергия может направляться на внутренний рынок страны;

– создание новых электрогенерирующих мощностей должно способствовать решению проблемы повышения надежности электроснабжения Восточной Сибири и Дальнего Востока;

– строительство новой ТЭС послужит толчком для социально-экономического развития региона.

Данные, необходимые для расчета  $NPV_{pl}$  проекта сооружения экспортной ТЭС с ежегодной поставкой до 30–35 млрд кВтч электроэнергии в Китай с учетом предельных цен на энергетический ресурс, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные данные, необходимые для расчета  $NPV_{pl}$  проекта сооружения экспортной ТЭС на Ковыктинском месторождении

Наименование	Ед. изм.	Мин. значение	Макс. значение
Тариф на генерацию	цент/кВтч	6,5 (предельны тариф – 3, с вероятностью 0,1)	7,4 (предельный тариф – 8, с вероятностью 0,05)
Спрос (продажа)	млрд кВтч	29,5	31
Цена газа	дол./1000 м <sup>3</sup>	45	60
Капиталовложения	млрд дол.	3,7	5

Источник: составлено автором по [46, 134, 140, 171]

Ставка дисконтирования принята равной 10%. Горизонт прогнозирования – 26 лет с выходом на проектную производительность к пятому году реализации проекта. Результаты расчетов, произведенных для оценки экономической эффективности проекта строительства ТЭС с учетом предельных цен на электроэнергию, отражены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты расчетов по оценке эффективности проекта строительства ТЭС с учетом предельных цен на электроэнергию

Вероятности $p_1/p_2$	$NPV_{pl}$	$NPV_g$	$\Delta NPV$ ( $NPV - NPV_g$ )	$NPV_{max}$	$NPV_{min}$
0,05/0,1	3,23	3,77	-0,54	8,05	-0,35
0,03/0,15	2,92	3,77	-0,85	8,05	-0,35
0,05/0,05	3,53	3,77	-0,24	8,05	-0,35

Источник: составлено автором

Как показали расчеты, ожидаемый чистый дисконтированный доход проекта ( $NPV_{pl}$ ), рассчитанный с учетом предельных цен, может значительно

отличаться от чистого дисконтированного дохода ( $NPV_g$ ), рассчитанного в рамках конвенционального подхода, предполагающего принятие цен на энергетический ресурс в рамках наиболее вероятного интервала. В случае с рассмотренным вариантом сооружения экспортной ТЭС на базе Ковыктинского газоконденсатного месторождения вариант остается экономически эффективным даже с учетом в процессе анализа предельных цен. Однако при оценке альтернативных вариантов капиталовложений учет предельных цен на реализуемых товар может иметь значение при принятии итогового решения.

Необходимость учета предельных цен на энергетические ресурсы в процессе оценки экономической эффективности проекта корреспондирует с идеями Н. Талеба о проблеме неучтенности маловероятных событий: из-за малой вероятности их возникновения они отбрасываются при принятии решений, но в случае их реализации могут значительно повлиять на конечный результат [337]. В условиях высокой волатильности цен на энергетические ресурсы, в результате которой даже самые объективные прогнозы дают неверные оценки (анализ прогнозов динамики энергетических рынков и сравнение их с реальными изменениями можно найти в [280]), использование предложенного выше метода с целью повышения обоснованности принимаемых инвестиционных решений в энергетике является целесообразным.

#### **4.3. Макроэкономические последствия реализации угрозы долгосрочного дефицита инвестиций в электроэнергетику**

Как было показано в первой главе, недостаток инвестиций является одной из важнейших стратегических угроз энергетической безопасности России, реализация которой способна оказать значительное негативное влияние на экономику страны и качество жизни населения.

Для оценки макроэкономических последствий дефицита инвестиций в экономику и электроэнергетику был использован комплекс моделей,



разработанных в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Схема оценки макроэкономических последствий и условий адаптации энергетики к разным сценариям развития экономики на базе моделей, разработанных в ИСЭМ СО РАН

Источник: [110]

В качестве базовой используется макроэкономическая модель МИДЛ, описывающая динамические взаимосвязи между ключевыми отраслями экономики, инвестиционные и экспортно-импортные связи на перспективу 10–20 лет. В данном исследовании использовалась последняя версия модели МИДЛ, подробно описанная в работе Ю. Д. Кононова [68].

Как правило, в целях долгосрочного макроэкономического планирования рассматривается несколько сценариев долгосрочного развития экономики страны, отличающихся, прежде всего, темпами роста ВВП, объемами конечного потребления и инвестиционных ресурсов, динамикой изменения

численности населения, а также объемами и структурой экспорта и импорта. На эти показатели настраивается межотраслевая макроэкономическая модель, и с ее помощью определяется соответствующая каждому сценарию динамика развития двадцати пяти отраслей экономики. Рассматриваемые отрасли экономики включают: машиностроение, черную и цветную металлургию, химическую промышленность, лесопромышленный комплекс, промышленность строительных материалов, легкую и пищевую промышленность, транспорт (газопроводный, нефтепроводный, автомобильный, железнодорожный, воздушный, водный транспорт), связь, строительство, торговлю, услуги, прочие отрасли. Топливо-энергетический комплекс представлен электроэнергетикой (отдельно рассматривается производство электроэнергии и централизованного тепла), добычей нефти и угля, газовой отраслью (включая магистральные газопроводы), переработкой нефти.

В имитационных моделях энергопотребления оценивается спрос для двадцати пяти отраслей экономики и непроизводственной сферы в электроэнергии, централизованном тепле и топливе. Информация о взаимосогласованных объемах валовой продукции всех отраслей поступает из макроэкономической модели (МИДЛ), а динамика изменения коэффициентов их энергоемкости определяется отдельно для новых и существующих производственных мощностей с учетом выбытия.

Модель МАКРОТЭК представляет собой систему балансовых уравнений, где определяются объемы производства разных видов топлива и структура генерирующих мощностей для обеспечения внутреннего спроса на энергоносители и осуществления экспорта.

Ниже приводятся результаты расчетов и количественная оценка возможного влияния снижения инвестиций на экономику и энергопотребление. Итеративным расчетам предшествовала настройка межотраслевой модели экономики на базовый сценарий развития экономики и ТЭК с умеренными среднегодовыми темпами прироста ВВП за период с 2020 г. по 2035 г. и

объемами инвестиций, достаточными для устойчивого развития экономики на долгосрочную перспективу. Этот сценарий близок по своим параметрам консервативному сценарию Минэкономразвития РФ. Он пролонгирован на перспективу до 2035 г. с учетом замедления темпов роста экономики в 2014–2016 гг. Согласно сценарию, спрос на электроэнергию по сравнению с 2016 г. увеличится к 2025 г. приблизительно на 30%, к 2030 г. – на 41%, к 2035 г. – на 46% [110]. Вместе с тем суммарное потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) возрастет весьма незначительно за счет структурной трансформации экономики и активной энергосберегающей политики (табл. 4.6).

Таблица 4.6 – Основные параметры базового сценария развития экономики и ТЭК на период до 2035 г.

	Единица измерения	Отчет	Прогноз		
		2016 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.
Население	млн чел.	146,5	147	143	143
Жилая площадь	м <sup>2</sup> /чел.	24	25	27	31
ВВП на душу населения	долл./чел.	14,2	20	25	30
Среднегодовые темпы прироста к базовому году					
ВВП	%	-	2,9	4,0	3,5
Инвестиции в основной капитал	%	-	4,0	4,3	3,6
Потребление электроэнергии	млрд кВт.ч.	1026,7	1330	1450	1500
Потребление ТЭР	млн т.у.т.	1071	1150	1160	1165

Источник: расчеты автора и к.т.н. О.В. Мазуровой на основе данных Прогноза долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 г.

В таблице 4.7 дана приближенная количественная оценка возможного негативного влияния снижения инвестиционных ресурсов в производственной сфере на основные макропоказатели и энергопотребление. Показано, что на каждый процент снижения по сравнению с рассмотренным консервативным сценарием прогноза Минэкономразвития 2013 г. годовой объем ВВП может снизиться на 0,3–0,4%, суммарное производство ТЭР – на 0,2–0,3%. Расчеты

проводились на обновленной макроэкономической динамической модели МИДЛ.

Таблица 4.7 – Оценка макроэкономического ущерба и снижения производства электроэнергии и топлива при сокращении инвестиций в производственную сферу

Показатель	Снижение инвестиций на 4%		Снижение инвестиций на 7%	
	отклонение, %	отклонение, млрд руб.	отклонение, %	отклонение, млрд руб.
ВВП	1,4	1140	3,0	2400
Валовая продукция – всего, в том числе:	1,5	1160	3,1	4540
Промышленность	1,7	1160	3,2	2230
Строительство	9,3	820	20,4	1840
Производство				
Электроэнергия	1,4	-	2,6	-
Первичные энергоресурсы	1,2		2,3	

Источник: расчеты автора и к.т.н. О. В. Мазуровой

На фоне роста доли изношенного и устаревшего оборудования сокращение инвестиций в ТЭК, необходимых для развития, модернизации и технического обеспечения эффективной работы энергетики, может стать серьезной проблемой для экономики страны в целом и потребителей энергоресурсов в частности. Исследование показало, что снижение требуемого по сравнению с базовым сценарием объема инвестиций в электроэнергетику страны может привести к снижению поставок электроэнергии потребителям из-за появления дефицита электроэнергии на внутреннем рынке. При осуществлении расчетов было сделано допущение, что образующийся дефицит электроэнергии для внутренних потребителей не будет компенсироваться увеличением импорта электроэнергии.

Проведенный анализ показал существенное негативное влияние дефицита производимой электроэнергии на производственные показатели практически всех отраслей экономики. Так, например, при 1%-м дефиците мощности от требуемого количества электроэнергии (примерно 15 млрд кВтч) среднегодовые потери объемов валовой продукции составили 0,4-0,5%,

производства промышленной продукции – 0,7-1%, строительно-монтажных работ – 1-1,1%. Через производственные связи это негативно отразилось также на сфере услуг, торговле и в транспортном секторе (табл. 4.8).

Таблица 4.8 – Прогнозируемый экономический ущерб при 1%-ом дефиците электроэнергии в 2025 г.

Потребитель электроэнергии, отрасль	Отклонение от базового варианта	
	млрд руб.	%
Всего в экономике	520-550	0,4-0,5
Промышленность	400-420	0,7-1,0
Строительство	90-100	1,0-1,1
Транспорт и связь	35-40	0,3-0,4
Торговля и сфера услуг	90-120	0,1-0,2

Источник: совместные расчеты автора и к.т.н. О. В. Мазуровой

Очевидно, что дальнейшее снижение объемов инвестиций и возрастание дефицита электроэнергии приведет к росту макроэкономического ущерба (рис. 4.13).

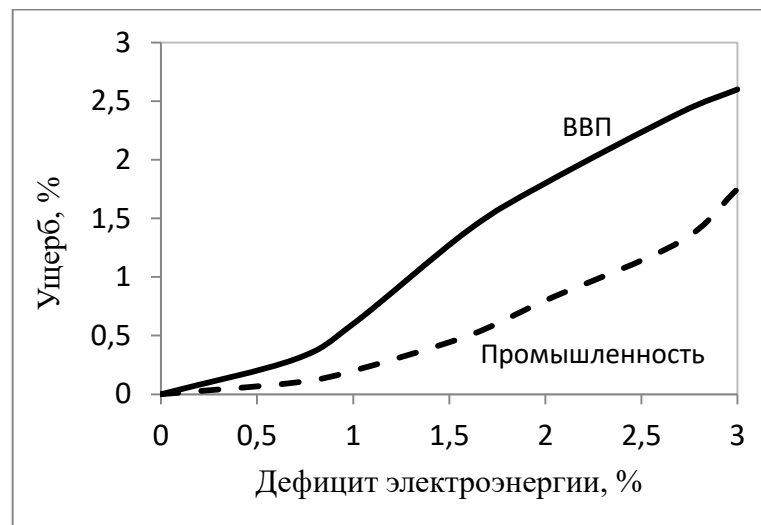


Рисунок 4.13 – Зависимость макроэкономического ущерба от дефицита мощности в электроэнергетике

Источник: расчеты автора и к.т.н. О. В. Мазуровой

Дефицит поставляемых энергетических ресурсов неминуемо приводит к отставанию развития национальной энергетики от потребностей экономики. В случае отставания развития национальной энергетики от потребностей экономики опережающий рост потребностей экономики в энергии над ростом

производственных мощностей ТЭК будет приводить к росту цен на энергоносители, замедлению темпов экономического развития и снижению уровня энергетической безопасности страны.

Длительное недофинансирование сектора электроэнергетики может вызвать крупномасштабный дефицит электроэнергии и неблагоприятные последствия во всех секторах экономики и социальной сфере. Как показало проведенное исследование, макроэкономические последствия от длительного дефицита поставок энергетических ресурсов растут нелинейно с увеличением его объемов. Очевидно, что в этом случае общий макроэкономический ущерб может оказаться значительно больше.

В долгосрочной перспективе реализация угрозы недопоставок энергетических ресурсов национальной энергетической системой может произойти вследствие ряда фундаментальных причин, варьирующихся от недостаточного инвестирования в ТЭК страны до ускоренного темпа экономического развития. Таким образом, количественная оценка возможного ущерба для экономики от дефицита поставок энергетических ресурсов является необходимой в процессе оценки адаптивности национальной энергетической системы. С целью обеспечения энергетической безопасности страны необходимо, во-первых, стимулировать рост объема инвестиций в экономику за счет создания благоприятного инвестиционного климата, а во-вторых, проработать вопрос о рациональности и путях повышения доли капиталовложений в ТЭК в структуре инвестиций в основные фонды с целью опережающего развития производственных мощностей и транспортных сетей энергетических компаний.

**Выводы по четвертой главе.** Инвестиции выступают необходимым ресурсом, обеспечивающим поступательное развитие и трансформацию национальной энергетической системы, что приводит к росту ее адаптивных свойств. На основе сформулированных принципов добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему были выделены основные направления положительного влияния инвестиций на

адаптивные свойства энергетических систем. На основе выделенных направлений положительного влияния инвестиций на адаптивные свойства энергетических систем, соответствующих сформулированным ранее принципам добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему с целью повышения ее адаптивных свойств, были предложены критерии оценки инвестиционных проектов с точки зрения эффективности их влияния на адаптивные свойства энергетической системы.

Было показано, что в силу наличия у крупномасштабных инвестиционных проектов в ТЭК ряда характерных особенностей (значительность объемов инвестирования и длительность сроков реализации; значительное влияние на финансово-экономическое состояние компании-реализатора и на ее рыночную капитализацию; высокая социальная, политическая и экономическая значимость для отрасли, региона и страны в целом; наличие эффекта обратной связи; значительное влияние на экологию; высокая неопределенность цен на энергоносители, обусловленная либерализацией рынков и усилением внешнеэкономических связей) для анализа механизма влияния инвестиций на уровень адаптивности энергетических систем необходимо различать общий поток совокупных инвестиций в ТЭК и отдельные крупномасштабные инвестиционные проекты. Сделан вывод о том, что значимые технико-экономические параметры влияния общего потока инвестиций и крупномасштабных инвестиционных проектов на адаптивные свойства энергетической системы отличаются.

Исследование свойства адаптивности сложных динамических систем с применением инструментов маржинального анализа, используемых при принятии управленческих решений, позволило выявить и описать свойство адаптивности инвестиционных проектов в ТЭК в контексте влияния реализации отдельных крупномасштабных проектов капиталовложений на адаптивные свойства энергетических систем.

Для инвестиционных проектов в энергетике, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой энергетических ресурсов, одним из

ключевых параметров, определяющих их экономическую эффективность ( $NPV$ ), является величина цены на энергоресурс. Поскольку инвестиционные проекты в энергетике, как правило, имеют длительный период реализации, цены задаются изменяющимся во времени интервалом ожидаемых значений.

В современных условиях для повышения обоснованности принятия инвестиционных решений в энергетике становится целесообразным при расчете экономической эффективности капиталовложений учитывать не только ожидаемые минимальные и максимальные цены на энергоносители, но и предельно возможные их значения. Предельные цены, в отличие от ожидаемых цен, определяются не на основе соотношения спроса и предложения, а на основе экономических возможностей производителей и потребителей энергии совершать сделки по купле-продаже энергетических ресурсов. В результате был предложен и апробирован метод учета предельных цен на энергоносители при анализе эффективности инвестиционных проектов, позволяющий повысить обоснованность принимаемых инвестиционных решений в энергетике за счет учета возможного колебания рыночной цены на энергоресурсы в их предельных значениях.

На основе комплекса моделей, разработанных в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, была осуществлена оценка макроэкономических последствий дефицита инвестиций в экономику и электроэнергетику. Проведенный анализ показал существенное негативное влияние дефицита производимой электроэнергии на производственные показатели практически всех отраслей экономики.

Было показано, что дефицит поставляемых энергетических ресурсов неминуемо приводит к отставанию развития национальной энергетики от потребностей экономики. В случае отставания развития национальной энергетики от потребностей экономики опережающий рост потребностей экономики в энергии над ростом производственных мощностей ТЭК будет приводить к росту цен на энергоносители, замедлению темпов экономического развития и снижению уровня энергетической безопасности страны. Длительное



недофинансирование сектора электроэнергетики может вызвать крупномасштабный дефицит электроэнергии и неблагоприятные последствия во всех секторах экономики и социальной сфере. Как показало проведенное исследование, макроэкономические последствия от длительного дефицита поставок энергетических ресурсов растут нелинейно с увеличением его объемов. Очевидно, что в этом случае общий макроэкономический ущерб может оказаться значительно больше.

Сделан вывод о том, что с целью обеспечения энергетической безопасности страны необходимо стимулировать рост объема инвестиций в экономику за счет создания благоприятного инвестиционного климата, а также обеспечить повышение доли капиталовложений в ТЭК в общей структуре инвестиций в основные фонды с целью опережающего развития производственных мощностей и транспортных сетей энергетических компаний.

## ГЛАВА 5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ

### 5.1. Влияние угроз энергетической безопасности на качество жизни населения

Одной из актуальных проблем современности является проблема обеспечения долгосрочного экономического роста и роста уровня жизни населения в условиях истощаемости традиционных источников энергии. Актуальность данной проблемы обусловлена целым рядом как объективных (истощаемость ископаемых видов топлива; рост затрат на добычу первичных энергетических ресурсов; ухудшение экологической обстановки), так и субъективных (рост интереса в мире к вопросам энергетической бедности, равного доступа к экономическим и социальным благам и др.) причин. Однако, как показал П. Терцакян [338], стремления мирового сообщества обеспечить долгосрочный рост мировой экономики и качества жизни населения сложно удовлетворить в рамках использования существующих энергетических технологий, системы управления экономикой и энергетических «привычек».

Качество жизни населения определяется многими параметрами и характеризуется разноплановыми агрегированными показателями: ВВП на душу населения; уровень социальных расходов государства; уровень неравенства в обществе (наиболее распространенный показатель - коэффициент Джини); уровень безработицы; уровень образования общества; уровень загрязнения окружающей среды; средняя продолжительность жизни населения и др. Кроме того, наряду с перечисленными количественными показателями качество жизни населения определяется и такими качественными характеристиками, как ощущение безопасности и уверенности в будущем у граждан страны. Полный обзор содержания понятия «качество жизни» содержится в работах таких авторов, как О. В. Глушкова [42], Р. Костанза [226], Д. Гаспер [241], Б. Ли [287]. В то же время в рамках рассмотрения динамики и факторов экономического роста, а также вопросов развития энергетических

систем, содержание понятия «качество жизни населения» часто сужают до его экономических аспектов, характеризуя его величиной объема ВВП на душу населения (уровнем благосостояния).

Рост качества жизни населения при прочих равных условиях напрямую связан с ростом энергопотребления, что проиллюстрировано в работах Дж. Ламберта [282], Л. Ли [288], К. Пастена [317]. Как показано в статье К. Зоу [362], активный долгосрочный мировой экономический рост, сопровождающийся стремительным ростом потребления энергетических ресурсов, начался с индустриальной революцией. Однако следует отметить, что в настоящее время за счет новых технологий, обеспечивающих рост энергоэффективности процессов преобразования, транспортировки и потребления энергетических ресурсов, прирост мирового благосостояния идет более быстрыми темпами, чем рост энергопотребления. Так в статье Е. В. Гальперовой и О. В. Мазуровой [37] приводятся данные о том, что энергоемкость мировой экономики с 1990 г. по 2015 г. снизилась на 32%, а фактический объем потребляемых первичных энергетических ресурсов за этот же период вырос на 61%. В то же время прямая зависимость между объемом потребления энергии и качеством жизни населения остается: чем выше уровень потребления энергии, тем выше уровень жизни населения.

В настоящее время дискурс проблемы обеспечения роста качества жизни населения был расширен вопросами качества и безопасности поставок энергетических ресурсов. Нарушение поставок энергетических ресурсов может различаться как по времени развертывания (краткосрочное или долгосрочное), так и по характеру перебоев в поставках (снижение уровня поставок энергетических ресурсов либо их полное прекращение). Как показано в работе А. Майерса и И. Смита [303], существует прямая связь между качеством жизни населения и уровнем национальной энергетической безопасности. Однако анализ данной взаимосвязи сводится, в основном, к анализу отрицательных социальных, экономических и иных последствий уменьшения поставок энергетических ресурсов для населения (как это сделано в работах Э. Мазура

[304], Р. Нидими [311, 312], Д. Эрнанденса [254] и др.) без учета вероятности их снижения, то есть угрозы энергетической безопасности не рассматриваются как риски снижения качества жизни населения. Между тем, взаимосвязь между уровнем жизни населения и уровнем энергетической безопасности характеризуется не только уровнем производства и потребления энергии, но и вероятностью его неблагоприятного изменения в будущем. Таким образом, рассмотрение угроз энергетической безопасности как рисков снижения качества жизни населения в результате снижения поставок энергетических ресурсов может способствовать расширению и развитию инструментария оценки уровня энергетической безопасности и выработки мер по его повышению, что будет положительно сказываться на качестве жизни населения.

Количественная оценка риска снижения качества жизни населения за счет реализации угроз энергетической безопасности в общем случае может быть осуществлена по следующей формуле:

$$r = c \cdot p \quad (5.1)$$

где  $r$  – риск снижения качества жизни населения за счет реализации угроз энергетической безопасности;

$c$  – ущерб экономическому благосостоянию населения;

$p$  – вероятность реализации угроз энергетической безопасности.

Экономический ущерб, снижающий качество жизни населения, проявляется по-разному в зависимости от того, текущие или стратегические угрозы реализуются [106]. Резкое снижение качества жизни населения может быть обусловлено внезапным перерывом в поставках энергетических ресурсов в результате реализации таких текущих угроз, как аварии, резкое ухудшение погодных условий (особенно характерно для районов Крайнего Севера), неблагоприятные социально-политические явления (например, введение эмбарго) и т. д. Краткосрочные перерывы в поставках энергетических ресурсов фактически не приводят к долгосрочному снижению качества жизни населения, а оказывают негативное краткосрочное воздействие непосредственно через

снижение или полное прекращение оказываемых населению услуг и поставляемых товаров.

Долгосрочное снижение качества жизни населения (или более медленное повышение качества жизни населения, чем потенциально возможно, а также по сравнению со странами-конкурентами) происходит в результате реализации стратегических угроз энергетической безопасности, приводящих к возникновению дефицита энергетических ресурсов либо росту цен на энергоносители, что тормозит экономический рост. В современной геополитической и социально-экономической ситуации наиболее значимыми стратегическими угрозами энергетической безопасности России являются:

- нехватка инвестиций в генерирующие мощности, вызванная такими обстоятельствами, как снижение инвестиционной привлекательности экономики России, ограничение доступа отечественных энергетических компаний к международным рынкам капитала и к зарубежным технологическим разработкам в области добычи углеводородов;
- дефицит генерирующих мощностей;
- неравномерное региональное развитие генерирующих мощностей;
- чрезмерный рост цен на энергетические ресурсы, вызывающий замедление экономического роста в стране.

Как было показано выше, перечисленные стратегические угрозы энергетической безопасности взаимосвязаны: недостаточные инвестиции в развитие ТЭК страны из-за неблагоприятного инвестиционного климата приводят к дефициту генерирующих мощностей и, как следствие, к росту цен на энергоносители и замедлению экономического роста.

В долгосрочном периоде экономический и социальный ущерб, вызванный реализацией стратегических угроз энергетической безопасности, имеет природу упущенных возможностей. Именно реализация долгосрочных угроз энергетической безопасности приводит к затяжным, сложно исправляемым последствиям снижения (или недостаточного роста) качества жизни населения. Поскольку стратегические угрозы энергетической безопасности являются

сложными явлениями, затрагивающими разные аспекты социально-экономической деятельности и создающими самоусиливающие процессы с положительной обратной связью (рис. 5.1), их влияние на уровень жизни населения является комплексным и протяженным во времени.



Рисунок 5.1 – Общая схема самоусиливающегося процесса возникновения и реализации стратегических угроз энергетической безопасности в контексте снижения качества жизни населения

Источник: составлено автором

На качество жизни населения оказывают прямое воздействие не только непосредственно реализация стратегических угроз энергетической безопасности, но и те условия, в которых данные угрозы реализуются. Например, международные санкции в отношении России (в частности, ограничения в доступе к международным рынкам капитала), создавая неблагоприятные условия функционирования отечественной экономики и, тем

самым, снижая уровень благосостояния граждан, могут привести к реализации такой стратегической угрозы, как чрезмерный рост цен на энергоносители, что также с течением времени будет снижать качество жизни населения.

Большинство социально и экономически развитых стран являются нетто-импортерами энергетических ресурсов, что обуславливает то обстоятельство, что большинство подходов к анализу проблемы обеспечения роста качества жизни населения рассматривают потребление энергетических ресурсов как базовые издержки общества, сопровождающиеся отрицательными внешними эффектами (как, например, загрязнение окружающей среды). Данного подхода к потребляемой обществом энергии как к чистым затратам общества придерживаются И. С. Белик и Л. В. Камдина [16], которые анализируют динамику доходов и потребительских расходов домохозяйств.

В то же время можно утверждать, что для стран-экспортеров энергоресурсов, для которых энергетические ресурсы являются важнейшим объектом внешнеторговых операций, служащим источником дополнительных доходов государства, взаимосвязь между объемами произведенных и потребленных энергетических ресурсов и качеством жизни населения является более сложной. Так в условиях, когда ТЭК является основным источником экспортных доходов, составляя при этом порядка четверти ВВП страны, объем производства энергетических ресурсов и эффективность работы отечественных энергетических компаний влияют на уровень качества жизни населения не только через объем потребляемой внутри страны энергии, но и через доход, получаемый от экспорта углеводородов, поскольку чем больше произведено и реализовано ТЭР как на внутреннем, так и на внешнем рынках, тем выше доходы государства и тем больше средств у государства на осуществление расходов на социальные нужды населения.

Для стран-импортеров энергетических ресурсов можно выделить следующую функциональную зависимость между уровнем жизни населения ( $QoL$ ), объемом потребления энергии ( $EC$ ) и уровнем технологического прогресса ( $T$ ), снижающим энергоемкость экономики:

$$QoL = f(PS, EC, T) \quad (5.2)$$

где  $PS$  (*population size*) – численность населения.

На объем потребления энергии разнонаправленно действуют два фактора (рис. 5.2):

- объем потребляемых товаров и услуг, напрямую определяющий количество потребленной энергии;
- научно-технологический прогресс, повышающий эффективность потребления энергии и, таким образом, понижающий энергоёмкость экономики [111].

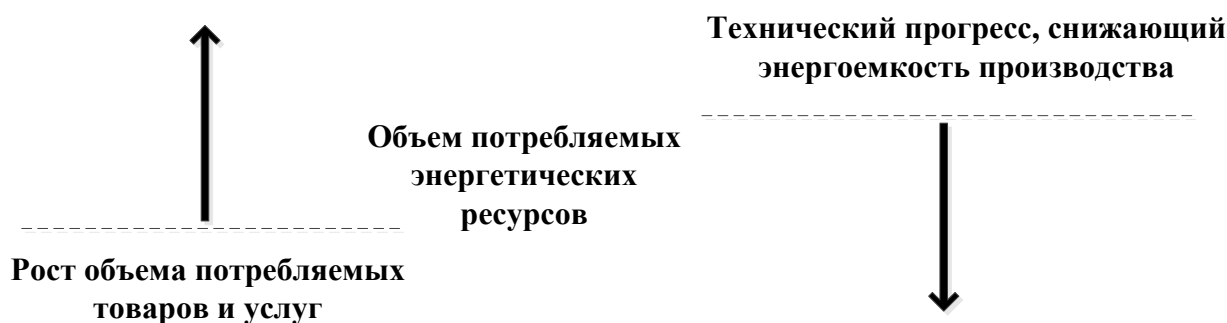


Рисунок 5.2 – Факторы, определяющие объем потребляемой энергии

Источник: составлено автором

Для стран, экспортирующих энергетические ресурсы, зависимость качества жизни населения от уровня производства и потребления энергетических ресурсов имеет больше основных переменных, увеличивающих внутренний эффективный спрос и создающих условия экономического роста:

$$QoL = f(PS, EC, T, x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (5.3)$$

где  $x_1$  – налоги и сборы, получаемые государством от экспортируемых энергетических ресурсов;

$x_2$  – расходы энергетических компаний на заработную плату работников, участвующих в добыче, переработке и транспортировке экспортных энергетических ресурсов;



$x_3$  – инвестиционные расходы энергетических компаний, осуществленные на внутреннем рынке (то есть приобретение отечественного оборудования и оказание услуг на внутреннем рынке);

$x_4$  – прибыль энергетических компаний от внешнеторговых операций, распределенная внутри страны.

Параметры  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  являются взаимосвязанными переменными, определяющимися такими параметрами, как объем спроса на энергетические ресурсы на международном рынке, цены на энергоносители, динамика роста производственного потенциала отечественных энергетических компаний и др. Однако их выделение необходимо для анализа ситуации и разработки комплексных социально-экономических мероприятий, направленных на повышение уровня жизни населения за счет реализации потенциала национальной энергетической системы. Таким образом, вышеприведенную зависимость можно представить в агрегированном виде:

$$QoL = f(PS, EC, T, X) \quad (5.4)$$

где:  $X$  – совокупный доход общества от внешнеторговой деятельности национальных энергетических компаний.

Если переменные, оказывающие влияние на уровень качества жизни населения принять за постоянные, тогда экономическое благосостояние общества будет возрастать (или уменьшаться) пропорционально росту (уменьшению) совокупных доходов  $X$  на величину мультипликатора, поскольку данное приращение ( $\Delta X$ ) фактически является первоначальным увеличением эффективного спроса, запускающим циклический процесс роста внутреннего предложения и роста доходов:

$$\Delta Y = Y_1 - Y_0 = k\Delta X \quad (5.5)$$

где  $\Delta Y$  – изменение совокупного дохода общества (экономического благосостояния);

$k$  – мультипликатор.

Таким образом, в  $i$ -ом году уровень качества жизни населения можно определить как:

$$QoL_i = Y_i PS_i^{-1} \quad (5.6)$$

Поскольку эффект мультипликатора действует как при увеличении, так и при сокращении базовых параметров, оценить риск снижения качества жизни населения за счет реализации стратегических угроз, ухудшающих экономическую эффективность национальных энергетических компаний, можно по формуле:

$$r = p\Delta Y = pk\Delta X \quad (5.7)$$

где  $k\Delta X$  – негативные последствия реализации угроз развития и функционирования отечественных энергетических компаний, приводящих к падению совокупного дохода государства.

Для сопоставления значимости угроз энергетической безопасности для разных регионов или для одного региона в разные периоды времени, необходимо риск снижения качества жизни населения соотнести с уровнем базового совокупного дохода ( $Y_0$ ):

$$CR = rY_0^{-1} \quad (5.8)$$

Чем выше значение коэффициента  $CR$ , тем при прочих равных выше относительная величина последствий риска снижения качества жизни населения за счет реализации стратегических угроз энергетической безопасности.

Используя предложенную схему оценки последствий риска снижения качества жизни населения за счет реализации стратегических угроз энергетической безопасности, а также результаты оценки макроэкономических последствий реализации такой стратегической угрозы энергетической безопасности, как дефицит инвестиций в электроэнергетику, приведенные в четвертой главе диссертационного исследования, были получены следующие результаты. Падение доходов населения в долгосрочном периоде (при условии сохранения текущей численности населения и структуры распределения

доходов) составит до 2,7% (при дефиците инвестиций 4%) и до 5,76% (при дефиците 7%). Величина мультипликатора, используемого для российской экономики, была взята в статье И. Е. Зяблицкого [55].

Общая схема оценки и анализа рисков снижения качества жизни населения за счет реализации угроз энергетической безопасности представлена на рис. 5.3.



Рисунок 5.3 – Алгоритм оценки рисков снижения качества жизни населения за счет реализации угроз энергетической безопасности

Источник: составлено автором

Как было показано выше, в условиях наличия больших запасов углеводородов в долгосрочной перспективе наиболее актуальными для России являются угрозы сокращения эффективности функционирования национальных

энергетических компаний и уменьшение их доходов от внешнеторговых операций, а не падение объемов фактически потребляемых на внутреннем рынке энергетических ресурсов. Поэтому вышеприведенный метод оценки рисков снижения качества жизни за счет реализации стратегических угроз энергетической безопасности может не включать возможность резкого и долгосрочного снижения поставок на внутренний рынок, то есть учитывать только совокупность параметров  $\{x_i\}$ .

При условии наличия в стране благоприятных институциональных условий развития промышленности эффект мультипликатора будет способствовать развитию не только энергетических систем, но и сопряженных отраслей национальной экономики, что приводит к увеличению переменной  $x_3$ . В этом контексте развитие импортозамещения не только повышает уровень национальной безопасности, но и оказывает положительное влияние на качество жизни населения. Таким образом, благодаря особой экономической роли ТЭК в структуре национальной экономики, механизм влияния стратегических угроз энергетической безопасности страны на уровень качества жизни населения может реализовываться как в направлении неблагоприятного изменения объема потребляемых на внутреннем рынке топливно-энергетических ресурсов, так и в направлении ухудшения динамики развития отдельных отечественных энергетических компаний и больших систем энергетики (рис. 5.4).

Для повышения качества жизни населения и снижения рисков его неблагоприятного изменения необходимо не просто увеличение производственного потенциала энергетических компаний, выпускаемая продукция которых будет направляться на экспорт, а комплексное развитие энергетических систем [202, 271, 284].



Рисунок 5.4 – Механизм влияния реализации стратегических угроз энергетической безопасности на качество жизни населения

Источник: составлено автором

Наращивание производственного потенциала отечественного ТЭК за счет экстенсивных мер не снижает вероятность реализации стратегических угроз и не уменьшает при прочих равных условиях негативных последствий их реализации, в то время как внедрение мер интенсивного развития энергетических систем может сопровождаться митигацией рассматриваемых рисков. Ниже приведена таблица основных возможных мероприятий, направленных на развитие как отдельных энергетических компаний, так и энергетических систем, которые в среднесрочной и долгосрочной перспективе будут, с одной стороны, снижать вероятность реализации стратегических угроз энергетической безопасности, негативно отражающихся на благосостоянии населения, с другой стороны, уменьшать величину отрицательных социально-экономических последствий в случае реализации этих угроз (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Основные экономические и технические меры, уменьшающие риски снижения качества жизни населения в случае реализации стратегических угроз энергетической безопасности

Период	Снижение вероятности реализации стратегических угроз энергетической безопасности	Снижение последствий воздействия реализации стратегических угроз энергетической безопасности на качество жизни населения
Краткосрочный	Увеличение резервных мощностей; диверсификация поставщиков энергетических ресурсов; развитие межсистемных связей, увеличивающих возможности перетоков электроэнергии; расширение транспортной инфраструктуры.	Увеличение гибкости организационных структур энергетических компаний; внедрение технологий Smart Grid, позволяющих быстро выявлять причины снижения или прекращения электроснабжения.
Долгосрочный	Развитие распределенной генерации; диверсификация источников энергетических ресурсов; улучшение инвестиционного климата за счет совершенствования нормативно-правовой базы.	Снижение энергоемкости экономики; развитие сопряженных ТЭК отраслей; диверсификация международных рынков сбыта энергетических ресурсов.

Источник: составлено автором

Заинтересованными сторонами в митигации рисков снижения качества жизни населения являются как собственники и руководители энергетических компаний, заинтересованные в более эффективной и стабильной работе своих организаций, так и правительство страны, ориентированное на поддержку интересов всего общества. В связи с этим меры, направленные на митигацию рисков снижения качества жизни населения в результате реализации угроз энергетической безопасности, должны осуществляться в рамках проведения государственной энергетической политики.

Развитие подхода к исследованию стратегических угроз энергетической безопасности как рисков снижения качества жизни населения имеет как практическое, так и теоретическое значение. Расширение научного знания о роли энергетических ресурсов и энергетических систем в процессе обеспечения роста качества жизни населения в современных условиях особенно актуально для России с ее развитым топливно-энергетическим комплексом и большим запасом углеводородов. Выделение и анализ рисков снижения качества жизни

населения в результате реализации угроз энергетической безопасности, а также исследование механизма их влияния на уровень экономического благосостояния и качество жизни населения обеспечат развитие методического инструментария снижения рисков реализации стратегических угроз энергетической безопасности страны и оценки ее уровня. Развитие методического инструментария, в свою очередь, будет способствовать разработке более эффективных мероприятий, направленных на повышение устойчивости ТЭК к стратегическим угрозам энергетической безопасности, способным оказать негативное воздействие на качество жизни населения, а также интеграции этих мероприятий в программы социально-экономического развития страны.

## **5.2. Снижение влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения за счет развития устойчивой энергетики**

Проблема влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения ставит вопрос о необходимости решения проблем обеспечения энергетической безопасности в рамках всей социально-экономической системы, а не только в рамках национальной энергетики [108]. Стратегические угрозы энергетической безопасности порождают негативный импульс, проходящий по межсистемным связям от элемента к элементу экономической системы страны, включающей и энергетику, и связям взаимодействия между элементами подсистем. Или, другими словами, товарные и финансовые цепочки передают негативный импульс, сформированный тем или иным неблагоприятным событием, приводя к снижению экономической активности и снижению уровня благосостояния граждан. В рамках экономической системы происходит либо затухание, либо усиление негативного первоначального импульса, вызванного реализацией той или иной угрозы энергетической безопасности. Импульс усиливается, когда вследствие неэффективной работы системы он ускоряет внутренние деструктивные процессы, приводя к снижению качества жизни населения.

Негативный импульс может иметь разную природу, однако в конечном итоге он оказывает отрицательное воздействие на качество жизни населения, приводя к снижению как реально располагаемых доходов, так и темпов экономического роста.

Распространение негативного импульса не происходит однонаправленно (линейно) из одного сегмента в другой. Попадая в следующий сегмент своего воздействия, импульс видоизменяется и по цепочкам межсистемных связей инициирует новые негативные изменения в сегментах своего первоначального распространения (рис. 5.5). Однако для выявления слабых мест, в которых происходит наибольший рост негативного эффекта от реализации угроз энергетической безопасности, данный процесс можно упростить и представить как однонаправленный.



Рисунок 5.5 – Процесс распространения импульса, сформированного негативным явлением

Источник: составлено автором

Деструктивный эффект негативного импульса может усиливаться с разным темпом в разных сегментах социально-экономической системы. На рис. 5.6 условно отображено усиление отрицательного влияния ( $E$ ) первоначального импульса, сформированного тем или иным неблагоприятным событием, при его распространении от элемента к элементу с течением времени ( $t$ ). Наклон кривой зависит от того, в каком из сегментов внутренние противоречия и негативные тенденции в большей степени усиливают отрицательный эффект.



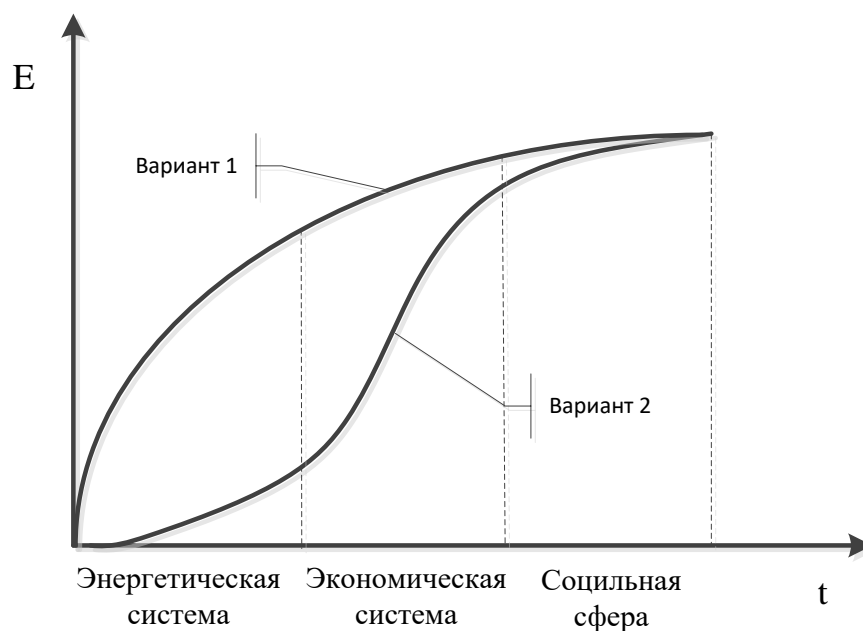


Рисунок 5.6 – Динамика суммарного негативного эффекта (E), полученного в результате распространения импульса

Источник: составлено автором

Как видно из рис. 5.6, в первом варианте кривой наибольший прирост негативного эффекта от распространения импульса проявляется в энергетике, в то время как во втором варианте наибольший прирост негативного эффекта от распространения импульса происходит в экономической системе. Можно выделить некоторые факторы, относящиеся к указанным сегментам, усиливающие негативное воздействие стрессового события (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Факторы, усиливающие негативный эффект от прохождения импульса в разных сегментах национальной экономики

Факторы, усиливающие негативное воздействие стрессового события	Характеристика влияния выделенных факторов на динамику распространения негативного импульса
Энергетическая система	
Высокая степень износа энергетических объектов	Рост аварийности, рост издержек производства, снижение экономической эффективности.
Низкий уровень пропускной способности межсистемных связей	В результате нарушения тех или иных цепочек поставок энергетических ресурсов резко повышается вероятность дефицита энергетических ресурсов.
Низкий уровень запаса производственных мощностей	В случае роста пиковых нагрузок повышается вероятность резкого роста цен на энергетические ресурсы.
Высокий уровень	Энергетические компании будут склонны все

монополизации рынка	негативные ситуации решать не за счет внутренних ресурсов, реорганизации и повышения своей эффективности, а за счет роста цен и понижения качества поставляемых энергетических ресурсов.
Экономическая система	
Высокая энергоемкость экономики	Рост цен на энергетические ресурсы приведет к значительному сокращению конкурентоспособности национальной экономики.
Большая доля ТЭК в структуре экономики	Снижение спроса и цен на энергетические ресурсы на мировых рынках, введение санкций против отечественных энергетических компаний и т.д. ведут к резкому снижению деловой активности за счет падения совокупного спроса.
Низкая инвестиционная привлекательность экономики страны в целом	Высокие риски инвестирования в страну приводят к дефициту финансирования национальных энергетических компаний, что в свою очередь в случае реализации стрессового события ускоряет процесс устаревания энергетических объектов, повышает аварийность и снижает производственный потенциал ТЭК страны.
Недостаточный уровень развития национального финансового рынка	Энергетические компании не могут в полной мере использовать инструменты финансового рынка, позволяющие привлекать финансовые ресурсы для осуществления антикризисных мероприятий.
Социальная сфера	
Высокий уровень социального неравенства	В результате реализации угроз энергетической безопасности будут страдать менее защищенные слои населения, что будет ухудшать социально-экономическую обстановку и понижать инвестиционную привлекательность страны.
Низкая мобильность трудовых ресурсов	В случае структурных изменений в экономике, происходящих в результате реализации угроз энергетической безопасности, процессы нахождения нового равновесного состояния будут замедляться, создавая дополнительный экономический ущерб как экономике страны в целом, так и отдельным домохозяйствам.
Высокий уровень коррупции	Снижает эффективность функционирования экономики страны и, как следствие, эффективность реакции системы на реализацию угроз энергетической безопасности.

Источник: составлено автором

Из табл. 5.2 видно, что чем ниже производственная и экономическая эффективность энергетических компаний, чем выше монополизация энергетического рынка, чем ниже качество и количество межсистемных связей и пр., тем выше деструктивный эффект реализации стратегической угрозы в

энергетической системе, приводящий к снижению уровня благосостояния граждан.

Когда ведущую роль в национальной экономике играет энергетический сектор, производственная деятельность слабо диверсифицирована, а многие фирмы-производители работают с низким «запасом прочности» (имеют высокую точку безубыточности), тогда негативные процессы, обусловленные реализацией угроз энергетической безопасности, приводят к лавинообразному эффекту, выраженному в падении совокупного спроса и деловой активности. Социальная сфера может усиливать деструктивный эффект негативного импульса в первую очередь через высокий уровень социального неравенства, низкую мобильность трудовых ресурсов и высокий уровень коррупции, что приводит к снижению адаптивных механизмов экономики к кризисным явлениям.

Обеспечение энергетической безопасности в рамках снижения влияния реализации стратегических угроз энергетической безопасности на качество жизни населения возможно посредством формирования и реализации комплексной энергетической и экономической политики, направленной на создание таких социально-экономических и финансовых условий, которые позволят нивелировать деструктивный эффект неблагоприятных стрессовых явлений [104].

Комплексное социально-экономическое развитие, позволяющее решать проблему обеспечения энергетической безопасности за счет повышения адаптивных свойств энергетических и экономических систем, снижения чувствительности уровня благосостояния граждан к стрессам разной природы и т.д., может быть обеспечено в рамках реализации концепции устойчивого развития (*sustainable development*) [291].

Впервые общепринятое определение термину устойчивого развития было дано в докладе «Наше общее будущее» Всемирной комиссией по окружающей среде и развитию (World commission on environment and development, WCED) в 1987 г. [353]. Устойчивое экономическое развитие определяется как развитие,

при котором текущие потребности общества удовлетворяются, не сокращая возможности удовлетворения потребностей будущих поколений. Концепция устойчивого развития, в определении WCED, накладывает ограничения на текущее потребление не в абсолютном неизменном выражении, а в зависимости от существующего уровня развития технологий и социальной организации. Развитие технологий и эволюция социальной организации расширяют возможности общества в объемах текущего потребления, не нанося при этом ущерба интересам будущих поколений. К настоящему времени трактовка понятия «устойчивое развитие» значительно расширилась. В 2016 г. рабочая группа Генеральной Ассамблеи ООН по целям устойчивого развития подготовила доклад («17 Sustainable Development Goals»), в котором были сформулированы задачи, способствующие достижению устойчивого развития: борьба с бедностью во всех ее формах во всем мире; обеспечение продовольственной безопасности; обеспечение общедоступности недорогого, надежного, устойчивого и современного энергоснабжения; обеспечение устойчивого экономического роста; борьба с изменением климата и его последствиями; рациональное использование природных ресурсов и др. Содержание понятия устойчивого развития стало включать не только сохранение существующего положения вещей, но и восстановление ущерба, причиненного обществом окружающей среде. Следует также отметить, что лишь немногие ученые разделяют понятия «устойчивое развитие» («sustainable development») и «устойчивость» («sustainability»), связывая «устойчивое развитие» преимущественно с экономическим развитием, а «устойчивость» - с обеспечением экологической безопасности стран и мира в целом [231]. Большинство же мировых исследователей используют эти понятия как синонимы.

В рамках концепции устойчивого экономического развития рядом ученых были сформулированы принципы такого развития, интегрированные в практику решения социальных, экономических и экологических проблем

многими правительственными и некоммерческими организациями по всему миру [243, 263, 281]:

1. Принцип взаимосвязанности. Согласно данному принципу развитие должно осуществляться с учетом экологических, социальных и экономических последствий тех или иных политических решений.

2. Принцип социальной ответственности коммерческих компаний, предполагающий их активное участие в реализации общественно важных программ, способствующих достижению сбалансированного развития.

3. Принцип глобальной ответственности. Сбалансированное развитие может быть достигнуто только на мировом уровне, что предполагает объединение финансовых, научных, энергетических и других ресурсов мирового сообщества.

4. Принцип научного решения текущих социальных, экономических, энергетических и политических проблем.

5. Принцип равенства внутри одного поколения и между разными поколениями в отношении доступа к ресурсам и возможностям удовлетворения своих потребностей.

Таким образом, концепцию устойчивого развития можно определить как концепцию сбалансированного развития, направленную на баланс интересов настоящего и будущих поколений, баланс интересов общества и окружающей среды, баланс интересов различных представителей общества и т.д. Несмотря на то, что концепция устойчивого развития еще находится на стадии становления, сам факт вхождения данной концепции в современный научный и политический дискурс оказывает положительный эффект на практику управления.

Одним из ключевых факторов достижения устойчивого развития является функционирование устойчивой энергетики. Устойчивая энергетика предоставляет собой энергетику, удовлетворяющую текущую потребность общества в энергии, не сокращая возможности удовлетворения потребностей в энергии в будущем [188, 268, 330]. Международное энергетическое агентство

определяет устойчивую энергетику как энергетику, учитывающую баланс между энергетической безопасностью, экономическим развитием и защитой окружающей среды [235].

На текущем уровне научно-технического и социального развития становится реальной возможность перехода энергетики, а вслед за ней и экономики, к новой парадигме функционирования. В наиболее общем виде трансформация сложившегося энергетического уклада характеризуется фундаментальными изменениями в энергетической системе, связанными с переходом к новым видам топлива и технологиям преобразования энергии. Исторически переход к новому энергетическому укладу всегда был связан с переходом к новому доминирующему виду энергетических ресурсов (от древесины к каменному углю, от каменного угля к нефти, от абсолютного доминирования в мировом энергобалансе нефти к увеличению доли используемого природного газа) и появлением соответствующих энергетических технологий. Переход же к устойчивой энергетике предполагает внедрение и распространение множества различных новых технологий (в том числе информационных) и значительную диверсификацию энергетического баланса в сочетании с более эффективным использованием углеводородов.

Концепция устойчивой энергетики также находится на стадии своего становления: в работах зарубежных ученых редко встречаются комплексные, всесторонние исследования структуры, динамики и закономерностей развития устойчивой энергетики. Изучая проблемы энергетики в контексте устойчивого развития, исследователи часто концентрируются на более узких проблемах: развитие возобновляемых источников энергии, способы снижения выбросов парниковых газов, повышение энергоэффективности экономики, усиление энергетической безопасности и др.

Открытым остается вопрос о сроках перехода к устойчивой энергетике [331, 333]. Прежде всего, нет единого мнения о том, какой момент в будущем может быть охарактеризован как точка перехода к устойчивой энергетике. В уже упомянутом докладе Генеральной Ассамблеи ООН («17 Sustainable

development goals») указывается порядка 230 показателей достижения устойчивого развития, пять из которых относятся к устойчивой энергетике:

1. Обеспечение всеобщего доступа к доступным, надежным и современным энергетическим услугам.

2. Существенный рост доли возобновляемых источников энергии в глобальном энергетическом балансе.

3. Удвоение глобальных темпов повышения энергоэффективности.

4. Усиление международного сотрудничества в целях облегчения доступа к исследованиям и технологиям в области «зеленой» энергии, включая возобновляемые источники энергии, передовые и более чистые технологии использования ископаемых видов топлива, а также содействие инвестициям в энергетическую инфраструктуру и технологии экологически чистой энергетики.

5. Расширение инфраструктуры для предоставления современных и устойчивых энергетических услуг.

Необходимость становления устойчивой энергетики в России обуславливается потребностью в решении проблем обеспечения энергетической безопасности страны, поскольку именно новые технологии, организационные структуры и внутренняя логика развития устойчивой энергетики, основанная на диверсификации источников энергии, развитии распределенной генерации, повышении эффективности переработки энергетических ресурсов и внедрении активного потребителя в электроэнергетическую систему, увеличивают адаптивные свойства как энергетических систем, так и экономики в целом. Таким образом, как отмечается в [155, с. 46], общесистемными критериями перехода России к новому энергетическому укладу являются:

– переход к гибкой архитектуре рынка, за счет увеличения числа производителей, развития распределенной генерации и др.;

– цифровизация энергетических объектов;

– внедрение новых бизнес-моделей управления энергетическими компаниями;

– трансформация принципов регулирования рынка (смещения акцента с поддержки производителей на поддержку активных потребителей).

Значимость процессов диверсификации источников энергии, развития распределенной генерации и повышения эффективности переработки энергетических ресурсов для становления устойчивой энергетики была рассмотрена ранее. Активным потребителем электроэнергии является потребитель, самостоятельно принимающий решения о режиме своего электропотребления и имеющий возможность реализовывать излишки генерируемой им электроэнергии. Как было показано выше, уровень адаптивности энергосистемы, кроме объемов затрат на ее приспособление к внешним и внутренним изменениям, определяется количеством возможных, доступных и эффективных вариантов реакции системы на эти изменения: чем их больше, тем система при прочих равных условиях более адаптивна. Появление активного потребителя как равноправного участника рынка электроэнергии способствует повышению уровня адаптивности энергосистемы, поскольку, увеличивая количество возможных вариантов реакции системы на происходящие изменения, дает возможность сглаживания пиковых нагрузок, снижения системного резерва, оптимизации режимов работы электростанций и электроэнергетической сети, сокращению расходов и потерь. Кроме того, в условиях реализации стратегических угроз энергетической безопасности, приводящих к росту цен на энергоносители, активные потребители имеют возможность быстро наращивать собственные генерирующие мощности электроэнергии, что сокращает их расходы на энергетические ресурсы и снижает негативный эффект от первоначального события. Появление активного потребителя оказывает значительное влияние на формирование структуры рынка, процесс ценообразования и т. д. В конечном итоге, активные потребители как новые акторы энергетического рынка несут новые возможности для решения проблем обеспечения энергетической безопасности.



Становление устойчивой энергетики неотъемлемо связано с внедрением новых информационных технологий в энергетические системы. Одними из основных трендов в развитии информационных технологий, которые нашли отражение в устойчивой энергетике, являются интеллектуальные системы управления и Интернет вещей. Как отмечает С. Н. Васильев, термин «интеллектуальная система управления» включает в себя комбинацию аппаратного и программного обеспечения, объединенных общим информационным процессом, способствующую достижению цели управления и оптимизации управляемых процессов [348]. Интеллектуальные системы управления давно используются в энергетических системах, однако в последнее десятилетие благодаря разработке новых технологий сбора, передачи и обработки информации, а также появлению новых задач управления, связанных с повышением надежности, безопасности и экологичности энергетических систем, интеллектуальные системы в энергетике переживают новую волну развития. Одним из примеров наиболее успешных современных проектов внедрения интеллектуальных систем управления в энергетические системы являются «умные сети» (Smart Grids), которые, с одной стороны, повышают надежность работы электроэнергетических сетей, а с другой стороны, дают потребителям новые инструменты управления энергопотреблением.

Интернет вещей позволяет не просто соединить большое количество разнородного оборудования в одну систему с интеллектуальным центром управления, но и создавать «цифровые двойники» буровых установок, нефтеперерабатывающих заводов, трубопроводов, электрических сетей, что дает возможность оперативно выявлять сбои и нарушения в работе всей системы, моментально находить источник этих сбоев и устранять их. Возможности и перспективы применения Интернета вещей в энергетике в настоящее время широко обсуждаются и рассматриваются в работах таких авторов, как Х. Голпир [247], Н. Х. Мотланг [310] и др.

Информационные технологии могут оказывать два принципиально разных воздействия на энергетическую систему, повышая ее адаптивные свойства (рис.

5.7). Во-первых, информационные технологии повышают экономическую и технологическую эффективность уже существующих методов добычи, транспортировки, переработки и потребления энергетических ресурсов, при этом принципиально не изменяя структуру и организацию управления энергетическими системами и создавая эффекты, которые легко оценить количественно. Во-вторых, информационные технологии, встраиваясь в существующую энергетическую систему с устоявшейся структурой, могут приводить к качественным ее трансформациям за счет изменения свойств отдельных элементов.

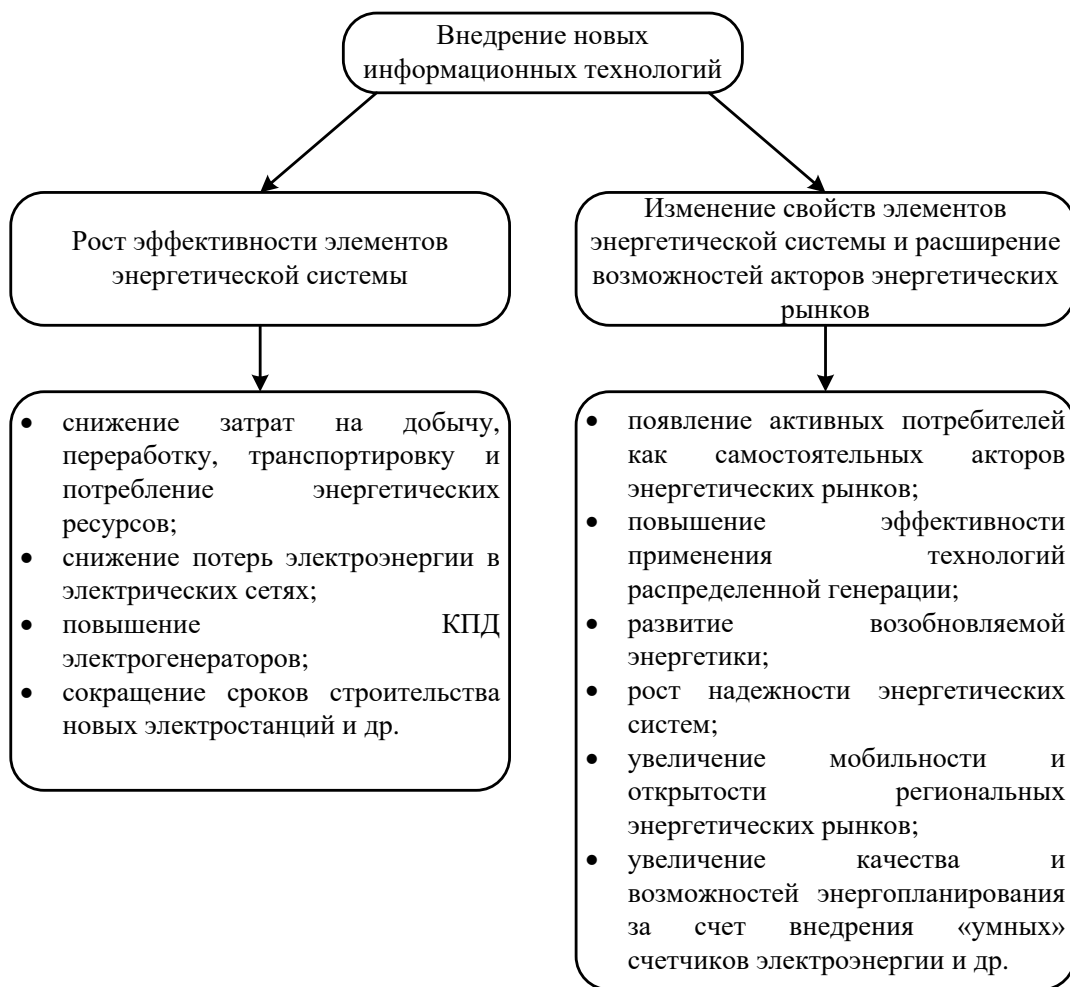


Рисунок 5.7 – Эффекты от внедрения новых информационных технологий в энергетическую систему.

Источник: составлено автором

Трансформированные элементы могут создавать динамические волны изменений структуры и организации процесса управления, приводя к расширению возможностей отдельных акторов и изменению их статуса в энергетической системе. Наиболее ярким примером увеличения возможностей отдельных акторов является появление технологий, обеспечивающих потребителей энергии способностью продавать излишки электроэнергии.

Развитие принципов устойчивой энергетики в рамках концепции устойчивого развития привело к появлению достаточно большого количества исследований в области анализа связи между качеством жизни населения и развитием энергетики. Проведенные исследования показывают, что долгосрочный рост качества жизни населения может быть обеспечен только на базе становления устойчивой энергетики. Снижение энергоемкости производства, уменьшение выбросов парниковых газов, развитие распределенной генерации, основанной на использовании возобновляемых источников энергии, являясь следствием развития устойчивой энергетики, повышают качество жизни населения за счет улучшения экологической обстановки, повышения безопасности производства и потребления энергии, а также за счет создания условий равного доступа к источникам энергии всех членов общества (борьбы с энергетической бедностью).

Развитие новых организационных структур в энергетике, внедрение новых информационных технологий, диверсификация энергетического баланса и т. д. позволяют создать механизмы, которые будут трансформировать самоусиливающийся процесс возникновения и реализации стратегических угроз энергетической безопасности, приводящий к снижению качества жизни населения (рис. 5.8).



Рисунок 5.8 – Снижение влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения за счет становления устойчивой энергетики

Источник: составлено автором

Следует отметить, что становление устойчивой энергетики не означает отказ от развития традиционной энергетики, основанной на добыче, переработке и потреблении углеводородов [294]. Элементы устойчивой энергетики могут выступать как дополнительные элементы национальной экономики, снижающие риски и последствия реализации стратегических угроз энергетической безопасности. Таким образом, можно утверждать, что

устойчивое социально-экономическое развитие страны, предполагающее использование механизмов развития устойчивой экономики и устойчивой энергетики, обеспечивает повышение качества жизни населения, а также способствует решению проблем обеспечения энергетической безопасности.

### **5.3. Институциональные способы решения проблем становления устойчивой энергетики в России**

Особая роль энергетики в современном обществе, обусловленная широтой охвата социальных, экономических и технологических проблем, решаемых в рамках макропроблемы обеспечения экономики страны или региона энергетическими ресурсами, привела к необходимости развития устойчивой энергетики – ресурсосберегающей и экологически чистой энергетики, основывающейся на принципах устойчивого развития и обеспечивающей высокое качество жизни населения. Объективная необходимость становления в России устойчивой энергетики обуславливается задачей обеспечения устойчивого долгосрочного экономического роста, сопровождающегося повышением качества жизни населения, а также необходимостью улучшения экологической обстановки и развития инновационной экономики [294]. В то же время сложившаяся структура доходов федерального бюджета стимулирует развитие традиционной энергетики, основывающейся на наращивании добычи, внутреннего потребления и экспорта углеводородов. Очевидно, что развитие технологий традиционной энергетики, использование преимущественно невозобновляемых источников энергии и увеличение экспорта нефти и газа в среднесрочной перспективе способно поддерживать текущий уровень благосостояния. Однако устойчивый долгосрочный рост экономики и уровня качества жизни населения может быть достигнут только при условии инновационного развития российской энергетики, направленного на становление устойчивой энергетики, ориентированной на баланс интересов экономики, экологии и будущих поколений.

В настоящее время Россия находится в самом начале пути становления устойчивой энергетики, о чем говорит динамика таких базовых параметров, определяющих развитие устойчивой энергетики, как доля возобновляемых источников энергии в структуре потребления первичных энергетических ресурсов (рис. 5.9) и объем выработанного углекислого газа (CO<sub>2</sub>).

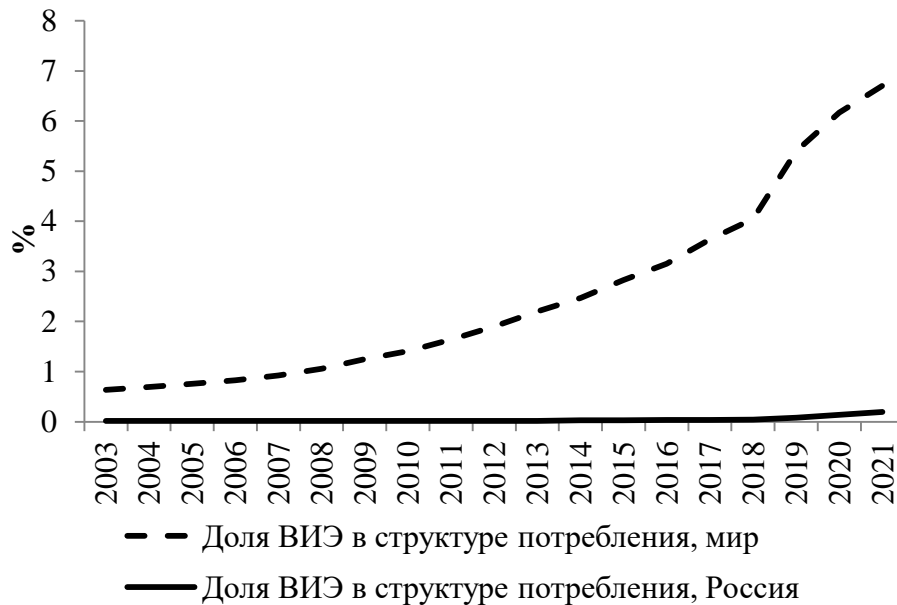


Рисунок 5.9 – Изменение доли возобновляемых источников энергии в структуре первичных энергетических ресурсов

Источник: составлено автором на основе данных ВР

На рис. 5.9 и 5.10 видно, что доля возобновляемых источников энергии в структуре первичных энергетических ресурсов в мире с 2003 г. по 2021 г. выросла с 0,6% до 6,5%, в то время как в России значение данного показателя выросло с 0,01% до 0,19%.

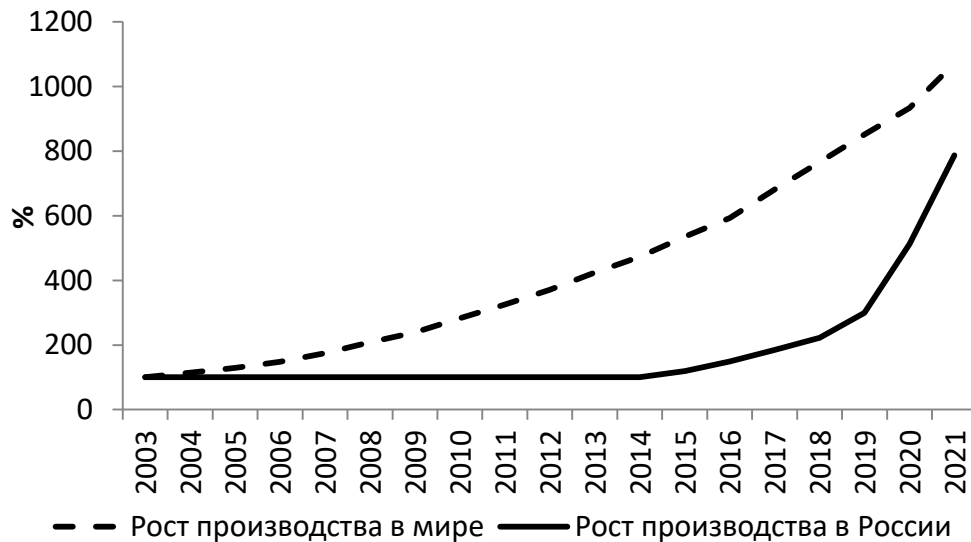


Рисунок 5.10 – Динамика выработки энергии из возобновляемых источников (за исключением гидроэнергетики)

Источник: составлено автором на основе данных ВР

Текущая политическая и экономическая ситуация в России препятствует реальному технологическому прогрессу в национальной энергетике. Такие факторы, как высокая капиталоемкость, длительный период строительства энергетических объектов, а также политическое влияние крупных национальных нефтегазовых компаний обуславливают значительную инерцию российской энергетической отрасли. В результате она продолжает развиваться по пути, определенному в прошлом: рост добычи нефти и природного газа; расширение сетей газо- и нефтепроводов и строительство крупных электростанций; дальнейшая монополизация отрасли. Таким образом, несмотря на актуальность предстоящего перехода к новому энергетическому укладу, на пути развития устойчивой энергетики в России существует множество барьеров, основные из которых – технологические и бизнес-барьеры.

Одним из основных технологических препятствий на пути развития возобновляемой энергетики в России является низкая эффективность использования возобновляемых источников энергии на электростанциях, работающих на ископаемом топливе. В 2017 году коэффициент использования

установленной мощности солнечных и ветряных электростанций в Единой энергетической системе России составил соответственно 14,67% и 14,82%. Однако, по данным Министерства энергетики Российской Федерации, возобновляемые источники энергии имеют большой потенциал для развития в отдаленных энергетических районах России. Кроме того, возобновляемые источники энергии могут быть использованы в качестве средства для повышения надежности энергоснабжения.

Другим технологическим препятствием на пути развития возобновляемой энергетики в России является отсутствие необходимых технологий. Россия обладает научно-техническим потенциалом для развития новых энергетических технологий, но в настоящее время страна не входит в число мировых лидеров в области энергетики. Для решения этой проблемы Министерство энергетики Российской Федерации помогает национальным энергетическим компаниям участвовать в международных энергетических проектах, проектировать собственное новое оборудование и получать доступ к зарубежным технологиям путем реализации государственной политики, которая может быть описана как «поддержка возобновляемых источников энергии в обмен на локализацию». Термин «локализация» означает, что правительство поддерживает иностранные инвестиции в отечественное производство оборудования для возобновляемых источников энергии при условии, что большая часть оборудования будет производиться в России. В ветроэнергетике потребность в российских компонентах установлена на уровне 65%. Правительство ожидает, что такая политика создания благоприятных условий будет способствовать выходу международных энергетических компаний на российский рынок не только в качестве поставщиков, но и производителей.

Локализация производства не только позволяет решить технологическую проблему российских энергетических компаний, но и привносит в страну новую корпоративную культуру и стандарты качества, что, в свою очередь, стимулирует российских производителей повышать собственную конкурентоспособность. Отсутствие внутренних инвестиций делает политику



локализации чрезвычайно важным инструментом экономического и промышленного развития российских регионов за счет повышения эффективности международных деловых связей. Иностранцы инвесторы могут извлечь выгоду из локализации производства в России, поскольку наряду с получением налоговых льгот они могут участвовать в государственных тендерах на тех же условиях, что и отечественные компании.

Политика локализации уже дала некоторые результаты. Россия нашла следующих технологических партнеров в развитии ветровой и солнечной генерации: Fortum Corporation (Финляндия), Vestas Wind Systems (Дания) и Lagerwey (Нидерланды). Например, корпорация Fortum производит электрическую и тепловую энергию на восьми тепловых электростанциях, расположенных в Челябинской и Тюменской областях. В 2018 году в российском подразделении корпорации Fortum начали работать три солнечных и одна ветряная электростанции.

Несмотря на все преимущества устойчивой энергетики, российскому правительству и энергетическим компаниям очень трудно повернуться к зеленой энергии и потерять огромные прибыли. Это тем более верно, учитывая тот факт, что возобновляемая энергия является довольно дорогой, особенно на фоне относительно дешевой выработки электроэнергии на ископаемом топливе. Кроме того, зеленая энергия в России сейчас финансируется в основном за счет потребителей, которые крайне недовольны ростом цен на электроэнергию. Вот почему гораздо более серьезными проблемами для перехода к устойчивой энергетике в России являются так называемые бизнес-барьеры. В целом, бизнес-барьеры для инновационного развития энергетических систем означают объективные факторы социального, экономического и политического характера, которые препятствуют созданию, внедрению и широкому распространению технологий и методов бизнеса, соответствующих новой парадигме устойчивого развития энергетики. Несмотря на значимость технологических препятствий, деловые барьеры остаются серьезной проблемой

для устойчивого развития энергетики в России. Существует четыре основных бизнес-барьера для развития в России устойчивой энергетики [289]:

- неразвитая инновационная инфраструктура;
- высокая неопределенность в отношении будущей государственной политики в области развития возобновляемых источников энергии;
- неэффективная государственная финансовая поддержка производителей возобновляемой энергии;
- отсутствие экологических налогов в России.

**Неразвитая инновационная инфраструктура.** Российские энергетические компании сталкиваются с проблемой эффективного использования инноваций для решения следующих задач: разработка и внедрение новых технологий, позволяющих повысить производительность возобновляемых источников энергии; строительство новых экологически чистых электростанций на ископаемом топливе; повышение эффективности и надежности электрических сетей за счет внедрения технологий интеллектуальных сетей. Проблема частично возникает из-за неразвитости инновационной инфраструктуры энергетической отрасли, что приводит к существованию неэффективных систем информационной поддержки инновационной деятельности энергетических компаний. Это усложняет взаимодействие между участниками инновационного процесса. Соответственно, у руководителей компаний отсутствует возможность учитывать результаты новых исследований, полученные на уровне отдельных исследовательских групп.

Российские энергетические компании, построенные по принципу жесткой организационной структуры, сталкиваются со всеми недостатками модели централизованного управления: чрезмерной бюрократией и оформлением документов; негибкостью бизнеса; отсутствием эффективных связей между подразделениями компании; неэффективным использованием всех видов ресурсов; отсутствием ориентации на потребителя. Эти недостатки снижают

эффективность управления и делают всю компанию неконкурентоспособной на динамичном и нестабильном рынке, препятствуя процессу инноваций.

Ситуация осложняется тем, что из-за большой неопределенности будущего развития российской экономики российские энергокомпании предпочитают вкладывать средства в развитие сети нефте- и газопроводов и инновации по добыче ископаемого топлива (в 2016 г. суммарные инвестиции российских энергетических компаний в инновации в области добычи ископаемого топлива составили 2,1 млрд долларов США), а не осуществлять инвестиции в инновации в области зеленой энергии. Кроме того, компании не вкладывают достаточно средств в развитие инновационной инфраструктуры, дающее результаты в долгосрочной перспективе.

**Высокая неопределенность в отношении будущей государственной политики в области развития возобновляемых источников энергии.** Несмотря на существование Государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики», в которой представлен план увеличения мощностей возобновляемой энергетики, в российском обществе преобладает мнение, что возобновляемая энергия является дорогой, экономически неэффективной, и ее не стоит развивать в стране с такими огромными запасами ископаемого топлива, которых хватит на ближайшие десятилетия, как Россия. Это мнение, влияющее на государственную энергетическую политику, приводит к отсутствию эффективной долгосрочной государственной стратегии развития возобновляемых источников энергии.

Нестабильность и непредсказуемость изменений законодательства являются критически важными для компаний, которые инвестируют в возобновляемые источники энергии. Учитывая текущую экономическую ситуацию в России и введенные международные санкции против российской энергетической отрасли, существует значительный риск того, что для сокращения бюджетных расходов, связанных с государственной поддержкой производителей зеленой энергии, правительство откажется выполнять свои

обязательства по поддержке текущих проектов в области развития возобновляемой энергетики. Таким образом, инвесторы должны принимать решения в атмосфере неопределенности, когда само существование государственной поддержки возобновляемых источников энергии в России сомнительно.

**Неэффективная государственная финансовая поддержка производителей возобновляемой энергии.** До 2011 года у мелких производителей (включая производителей экологически чистой энергии) была возможность продавать электроэнергию собственного производства потребителям под надзором гарантирующего поставщика. Гарантирующим поставщиком является энергетическая компания, обязанная заключить соглашение о поставках электроэнергии с любым запрашивающим конечным потребителем в своем конкретном регионе. Гарантирующие поставщики также были обязаны покупать электроэнергию у розничных производителей по утвержденным правительством тарифам. Таким образом, производители зеленой энергии имели гарантированные продажи.

В результате начавшейся в 2011 году либерализации российской электроэнергетики были созданы оптовые и розничные рынки электроэнергии и мощности, ценообразование на оптовом рынке электроэнергии стало нерегулируемым, а обязательство крупных энергетических компаний покупать электроэнергию у розничных производителей было отменено. Однако в 2013 году гарантирующие поставщики снова стали обязаны покупать излишки электроэнергии у мелких производителей по ценам, равным средневзвешенным ценам покупки электроэнергии (мощности) на оптовом рынке.

С 2013 года основным инструментом государственной поддержки возобновляемых источников энергии в России является льготный тариф. Правительство предлагает долгосрочные контракты производителям возобновляемой энергии с ценами, связанными с затратами на производство каждой технологии. Контракт заключается на основе конкурсов, по которым осуществляется отбор проектов по критерию наименьших капитальных затрат.

Для участия в конкурсе компаниям необходимо выполнить два следующих требования: требование гарантии и требование локализации.

Чтобы принять участие в конкурсе по отбору проектов, компания должна предоставить гарантию того, что объект возобновляемой энергии будет построен. Если объект не построен, гарант заплатит штраф (5% от капитальных затрат проекта). Описанная выше политика локализации, которая используется для привлечения инвестиций в производство оборудования для электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, также применяется к компаниям, занимающимся производством электроэнергии из возобновляемых источников. Правительство установило требования к минимальному уровню локализации оборудования для ветряных электростанций, солнечных станций и малых гидроэлектростанций (табл. 5.3.).

Таблица 5.3 – Требования к минимальному уровню локализации оборудования по разным типам электростанций

Тип электростанции	Год	Минимальный уровень локализации оборудования, %
Ветряные электростанции	2019-2024	65
Солнечные электростанции	2016-2024	70
Малые гидроэлектростанции	2018-2024	65

Источник: постановление правительства Российской Федерации от 28 мая 2013 г. №449  
URL: <http://static.government.ru/media/acts/files/0001201306030016.pdf>

Поскольку политика локализации стала применяться относительно недавно, количества производимого в России энергетического оборудования недостаточно для того, чтобы все участники рынка достигли минимальных требований к местному содержанию. Таким образом, государственные требования по гарантиям и локализации оборудования для электростанций создают проблемы для инвесторов с получением финансовой поддержки.

**Отсутствие экологических налогов в России.** Несмотря на то, что И. А. Башмаков [14] и другие специалисты еще в 1990-х гг. отмечали, что экологические налоги являются важнейшим инструментом природоохранной политики государства, экологических налогов в России все еще нет.

В настоящее время российским законодательством предусмотрены следующие платежи, связанные с загрязнением окружающей среды:

- экологический сбор (уплачивается компаниями за переработку и утилизацию товаров и упаковки);
- платеж за негативное воздействие на окружающую среду (оплачивается компаниями за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу стационарными источниками, выбросы загрязняющих веществ в воду и размещение отходов).

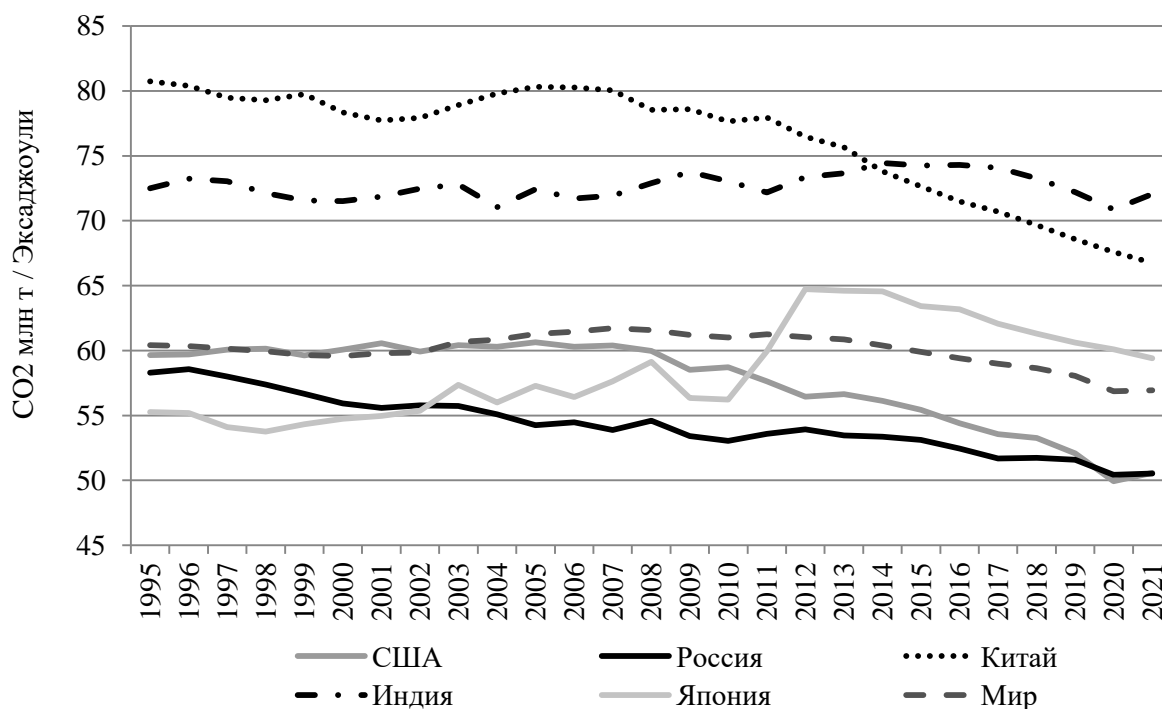
Администрированием этих платежей занимается Федеральная служба по надзору в природопользовании. Уплаченные платежи, которые поступают от плательщиков экологического сбора, направляются на реализацию государственных программ в форме субсидий субъектам РФ на софинансирование экологических программ. Однако анализ динамики поступлений платы за негативное воздействие на окружающую среду в бюджетную систему Российской Федерации свидетельствует о низкой эффективности взимания данного неналогового платежа, обусловленной отчасти недостаточной ответственностью, предусмотренной за его неуплату [113].

Поскольку в настоящее время производители зеленой энергии вынуждены конкурировать с другими производителями энергии практически в одинаковых налоговых условиях, для изменения сложившейся ситуации Министерство финансов Российской Федерации предложило ввести экологический налог для компаний и индивидуальных предпринимателей, которые несут ответственность за непоправимый ущерб окружающей среде. Согласно предложению, зафиксированному в Стратегии долгосрочного развития РФ до 2050 года с низким уровнем выбросом парниковых газов (документ разработан в соответствии с распоряжением Правительства № 2344-р от 03.11.2016), фиксированные налоговые ставки будут применяться к выбросам различных веществ в воздух, сбросам в воду, а также к удалению промышленных отходов. Плательщики налога будут иметь возможность уменьшить его величину за

счет проведения мероприятий, которые реально смогут уменьшить негативное воздействие на природу. Минфин считает, что принятие поправок позволит без изменения уровня налоговой нагрузки увеличить поступления в бюджет за счет улучшения качества администрирования. А это, в свою очередь, будет благотворно влиять на экологическое развитие Российской Федерации. Новый налог поможет повысить эффективность взимания платы за загрязнение окружающей среды, однако существует опасение, что перевод неналоговых платежей за негативное воздействие на окружающую среду в категорию налоговых платежей без разработки четких механизмов распределения налоговых поступлений для реализации программ поддержки зеленой энергии приведет к ненадлежащему использованию собранных налогов.

Тем не менее, введение экологического налога в России является необходимым, но не достаточным стимулом для российских энергетических компаний по сокращению выбросов за счет развития зеленых технологий. Следующим шагом в реформировании российского налогообложения в направлении его экологизации может стать введение углеродного налога, конечной целью которого является ограничение климатических изменений, обусловленных выбросами парниковых газов.

По мнению разработчиков Парижского соглашения по климату, в начале XXI в. выбросы парникового газа, связанные с деятельностью человека, достигли исторического максимума. Однако несмотря на продолжающийся абсолютный рост выбросов парниковых газов в мире (так с 2005 г. по 2015 г. объем выбросов  $\text{CO}_2$  в мире вырос с 28 533 млн т. до 33 508 млн т.), за последние 10 лет обозначился процесс снижения удельных выбросов  $\text{CO}_2$  на 1 т.н.э., потребленную экономикой (рис. 5. 11). Исключение составляет Япония, где в 2011 г. произошел резкий скачок удельных выбросов  $\text{CO}_2$ , поскольку в результате аварии на АЭС Фукусима-1 правительство Японии пошло на резкий отказ от ядерной энергетики, снизив поставки электроэнергии с АЭС с 31,2% в феврале 2011 г. до 0% в мае 2012 г., и увеличив долю углеводородов в энергобалансе страны.

Рисунок 5.11 – Удельный объем выбросов CO<sub>2</sub>

Источник: рассчитано автором по данным ВР

Россия присоединилась к Парижскому соглашению и должна сократить углеводородные выбросы на 25% по сравнению с уровнем 1990 г. Исследование И. А. Башмакова и А. Д. Мышака [12] показало, что это вполне реально. Однако на практике достижению данной цели препятствуют некоторые распространенные заблуждения со стороны экспертов, чиновников и представителей бизнеса, свидетельствующие о том, что проблема снижения выбросов парниковых газов и продолжения мирового сотрудничества по этому вопросу воспринимается в российском обществе в большей степени в контексте имиджа страны, а не реальной угрозы. Так, например, считается, что реализация мер по сокращению выбросов парниковых газов приведет к повышению рисков экономического развития регионов страны, значительная доля энергобаланса которых приходится на уголь, а также к ухудшению инвестиционной привлекательности тех регионов, в которых расположены энергоемкие производства. В то же время экологи сходятся во мнении, что в проблеме сокращения углеводородных выбросов вместо угрозы российской



экономике можно увидеть возможность структурных изменений в энергетике и направить усилия на развитие энергетических альтернатив, которые обеспечат экономическое и социальное развитие в данных регионах.

Другое распространенное заблуждение связано с тем, что введение углеродного налога или механизма углеродных квот станет причиной снижения темпов экономического развития страны из-за дополнительной финансовой нагрузки вследствие повышения цен на электроэнергию и тепло. В качестве опровержения И. А. Башмаков и др. приводят в пример экономическую ситуацию в большинстве европейских стран, применяющих углеродный налог [13, 15]. Кроме того, в среднесрочной перспективе повышение цен на электроэнергию для конечных потребителей при прочих равных условиях стимулирует развитие и применение энергосберегающих технологий, что также будет способствовать достижению целей развития устойчивой энергетики.

Таким образом, наблюдаемые в России за последние 20 лет небольшие изменения выбросов  $\text{CO}_2$  объясняются преимущественно структурными изменениями экономики и динамикой объема реального ВВП страны (рис. 5.12), а не качественными изменениями в функционировании национальной энергетической системы.

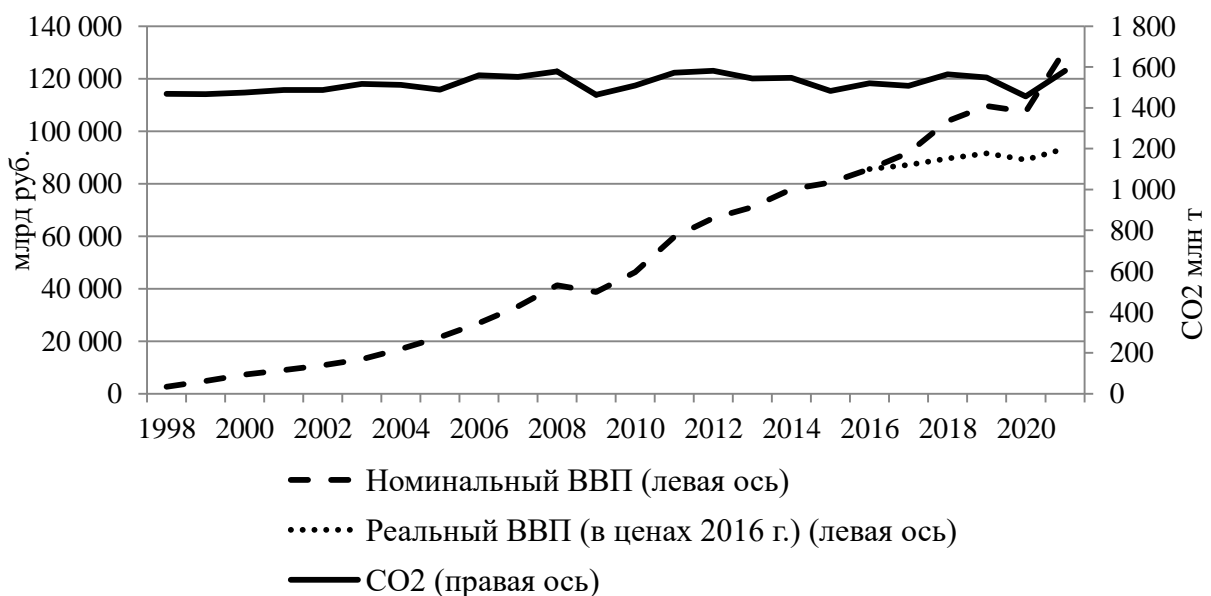


Рисунок 5.12 – Динамика выбросов  $\text{CO}_2$  и ВВП России

Источник: рассчитано автором по данным ВР

Основная задача, поставленная Парижским соглашением – продолжить снижение выбросов парниковых газов и ограничить рост температуры двумя градусами. Поскольку изменение климата оказывает значительное воздействие на экономическое развитие, решение данной проблемы является неотъемлемой составляющей достижения устойчивого экономического развития. Одним из эффективных решений данной проблемы является введение углеродного налога.

Согласно исследованиям Организации экономического сотрудничества и развития, в большинстве стран совокупность действующих экологических налогов (топливные акцизы, налоги на выбросы загрязняющих веществ и др.) дополняется углеродным налогом для производителей энергии [233]. В Европе налог на углерод стал вводиться в Скандинавских странах дополнительно к налогам на энергию в 1990-1991 гг. Первоначально его ставка составляла примерно 11-13% от суммы налога на энергию. Размер налоговой ставки снижался на 25% для компаний, которые подписывали с правительством долгосрочные соглашения по энергосбережению. 40% средств, собранных от налога на углерод, направлялись на субсидирование внедрения экологически чистых технологий, а 60% налога возвращалось промышленности. С момента введения углеродного налога и по настоящее время в Европе выбросы CO<sub>2</sub> в энергетическом секторе снизились более чем на треть, а ВВП вырос почти наполовину. В настоящее время средняя эффективная ставка налога на углерод по всем секторам экономики в 41 стране, рассматриваемой в исследовании ОЭСР, равна 14,4 евро/тCO<sub>2</sub>, однако текущий уровень налоговых сборов не соответствует реальным затратам на ликвидацию потерь от изменения климата [233].

Поскольку производство и потребление энергии будет непрерывно увеличиваться в последующие годы, необходимо ускорить процесс перехода к устойчивой энергетике за счет повышения эффективности энергетических технологий и развития возобновляемых источников энергии. Текущая ситуация в российской энергетике может быть описана следующим образом:

экологически и экономически неэффективная система, не имеющая внутренних стимулов для самосовершенствования, продолжает следовать давней траектории экстенсивного развития. Попытка инициировать процесс перехода к устойчивой энергетике в России была предпринята 7 лет назад, когда проводилась либерализация российской электроэнергетики. Одной из целей реформы было повышение эффективности российской энергетики и создание благоприятных условий для внедрения технологий использования возобновляемых источников энергии. Однако основные барьеры на пути развития российской энергетики до сих пор не преодолены. Вот почему только активная государственная энергетическая политика, направленная на преодоление технологических и бизнес-барьеров, может способствовать трансформации национальной энергетической системы в соответствии с принципами устойчивого развития.

В условиях осознанной необходимости развития устойчивой энергетики актуальной становится задача изменения траектории развития национальной экономики с учетом существования сильных экономических стимулов к использованию традиционных источников энергии. Поскольку траектория развития экономических систем определяется не только текущей структурой относительных цен и инвестиционных стимулов [65], но и сложившейся системой общественно-экономических институтов, в целях становления в России устойчивой энергетики необходимо создание благоприятной институциональной среды, учитывающей усложнение взаимосвязей экономики и энергетики, рост неопределенности, а также смещение акцентов при планировании экономического и энергетического развития на показатели качества жизни населения.

В России исторически сформировалась институциональная среда, стимулирующая эффективное функционирование и развитие крупных энергетических компаний-монополистов, обладающих высокой инерционностью своего развития, что обуславливает устойчивость тренда поступательного развития традиционной энергетики. Подобная

институциональная среда сложилась в результате действия множества факторов, однако наибольшее влияние на данный процесс оказали следующие обстоятельства [290]:

1. Особенности экономической системы Советского Союза. Экономическая система Советского Союза обуславливала создание больших промышленных и энергетических предприятий, сложно адаптируемых к созданию мобильных конкурентных рынков. Институциональная и производственная среда, доставшаяся России в наследство от Советского Союза, до сих пор оказывает существенное влияние на текущее развитие российской экономики и энергетики, что соответствует идеям Д. Норта, согласно которым формальные и в особенности неформальные институты, обладая высокой инерционностью, трансформируются крайне медленно.

2. Быстрая либерализация экономики в 1990-х гг., в дальнейшем сменившаяся ее последовательным огосударствлением. Начиная с 2000-х гг. государство стало все больше вмешиваться в экономические процессы. Бюрократизировав процедуры управления крупными энергетическими компаниями, государственные органы понизили возможности их адаптации к процессам, происходящим в мировой экономике и энергетике.

Энергетические системы по своей природе являются инерционными, однако особенности институциональной среды могут усиливать или ослаблять инерционность, ускоряя или замедляя темпы их эволюционных изменений. Можно выделить следующие основные особенности институциональной среды, формирующие высокую инерционность развития российских энергетических компаний [290]:

1. Низкая конкуренция на энергетическом рынке, проявляющаяся в преобладании крупных энергетических компаний, способных лоббировать свои интересы при разработке и осуществлении государственной энергетической политики.

2. Высокие законодательные барьеры, затрудняющие выход на рынок потенциальных производителей зеленой энергии.

3. Политизация международной торговой деятельности крупных энергетических компаний, приводящая к государственному стимулированию наращивания добычи и экспорта нефти и газа.

4. Финансовая и организационная поддержка деятельности крупных энергетических компаний.

5. Слабое распространение и приятие в российском обществе идей борьбы с загрязнением окружающей среды и изменением климата.

Создание институциональной среды, способствующей становлению в России устойчивой энергетики и обеспечению долгосрочного роста уровня жизни населения, является сложной, но реализуемой задачей. Так как существующие неформальные институты трансформируются под воздействием изменения условий функционирования экономических субъектов, правительство может инициировать трансформацию институциональной среды посредством изменения формальных институтов. В рамках проведения целенаправленной государственной энергетической политики возможно создание замкнутого самоусиливающегося трансформационного процесса, в котором изменения институциональной среды (а именно, формальных институтов) будут приводить к системным изменениям в энергетике (созданию адаптивной распределенной генерации, развитию возобновляемых источников энергии, созданию инфраструктуры разработки и внедрения новых энергосберегающих технологий), которые, в свою очередь, будут стимулировать изменения неформальных институтов (рис. 5.13). В данном случае речь идет не о смене институциональной матрицы с X-матрицы на Y-матрицу [65], а о создании таких новых формальных и неформальных институтов, которые будут стимулировать развитие энергетических систем в приоритетном направлении за счет формирования желательных трансформационных мотивов.

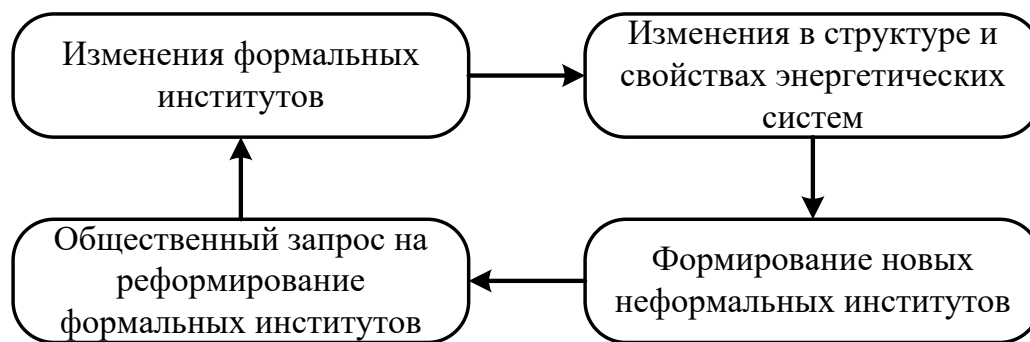


Рисунок 5.13 – Самоусиливающийся процесс изменения институциональной среды функционирования отечественных энергетических компаний

Источник: составлено автором

Одним из наиболее эффективных инструментов создания необходимых трансформационных стимулов является реформирование национальной налоговой системы. Налоги оказывают значительное влияние на экономическое развитие, оказывая косвенное воздействие на решения, принимаемые субъектами экономики. Как было показано выше, налоговая реформа может сделать налоги мощным инструментом стимулирования внедрения новых энергосберегающих технологий, сокращения выбросов диоксида углерода и увеличения доли возобновляемых источников энергии в структуре энергопотребления.

В настоящее время, олицетворяя качественные изменения парадигмы общественно-экономического развития в соответствии с базовыми принципами концепции устойчивого развития, экологические налоги активно применяются зарубежом и занимают особое место в системе налогов и сборов любого экономически развитого государства. Учитывая опыт зарубежных стран, можно отметить, что успешное введение экологических налогов во многом обуславливается комплексностью подхода к реформированию действующего налогообложения в соответствии с принципами концепции устойчивого развития. По мнению ряда специалистов [13], реформирование российского налогообложения в направлении его экологизации должно предусматривать следующее:

1. Должна быть разработана единая концепция экологического налогообложения, включающая четко сформулированные цели и поставленные задачи, решение которых должно быть направлено на достижение устойчивого экономического развития на базе экологически чистых и ресурсосберегающих технологий.

2. Действующие налоги на использование природных ресурсов должны быть переведены в разряд экологических.

3. Введение углеродного налога должно осуществляться в соответствии с принципом фискальной нейтральности, то есть сопровождаться понижением ставок по ряду действующих налогов.

4. Ставка углеродного налога должна соответствовать экономическому ущербу, который причиняет каждая дополнительная единица выбросов CO<sub>2</sub>.

5. Необходимо совершенствовать механизмы мониторинга наносимого экологического ущерба.

Реформирование налоговой системы России посредством введения экологических налогов позволит корректировать нежелательные для общества способы производства и снижать масштабы использования в энергетике технологий, наносящих ущерб окружающей среде, способствуя выходу российской энергетики на траекторию устойчивого развития.

Другим инструментом, способствующим формированию устойчивой экономики и энергетики, а также решению задачи обеспечения долгосрочного роста качества жизни населения, является финансовый рынок [99]. Цели устойчивого развития оказывают непосредственное влияние на создание современных инвестиционных тактик, совершенствование финансовых и инвестиционных продуктов и инструментов. Тенденция внедрения ESG подхода (Environment, Social and Governance) в практику принятия управленческих решений, безусловно, является одним из инструментов перехода к устойчивой энергетике. Согласно данному подходу к инвестированию, компания или индивидуальный инвестор внедряет в практику оценки инвестиционных проектов и принятия инвестиционных решений

критерии социально-ответственного поведения. В рамках энергетической отрасли социально-ответственное поведение выражается, в первую очередь, в экологизации деятельности компаний и повышении их социальной роли.

Однако необходимо отметить пределы практического использования данного подхода. Проблема заключается в том, что с ростом абсолютных и относительных объемов капиталовложений в устойчивые проекты, эффективные с точки зрения ответственного поведения, будет нарастать противоречие между коммерческим интересом инвесторов, заключающимся в максимизации прибыли, и интересами компании, стремящейся осуществлять свою деятельность в соответствии с критериями концепции устойчивого развития (снижение выбросов, рост социальной защищенности, снижение неравенства и т.д.). Данное противоречие неминуемо приведет к замедлению роста объема финансирования устойчивых проектов и появлению конфликтной ситуации, в которой правительствами ряда стран, а также группами заинтересованных лиц будет оказываться давление на частных инвесторов с целью заставить их инвестировать в экономически неэффективные или малоэффективные проекты. В настоящее время внедрение ESG подхода в практику оценки эффективности инвестиций в энергетику с коммерческой точки зрения может быть оправдано повышением лояльности потребителей, инвесторов и правительств. С достижением некоего порогового значения данное противоречие приведет к замедлению трансформационных процессов.

Несмотря на неоднозначность влияния использования ESG подхода на инвестиционную активность в долгосрочной перспективе, соответствие деятельности компаний принципам устойчивого развития уже оценивается ведущими мировыми рейтинговыми агентствами, а использование «зеленых» финансовых инструментов стало эффективным способом стимулирования инвестиций в развитие и внедрение технологий энергосбережения [204, 276].

В настоящее время ответственные инвестиции привлекают внимание инвесторов во всем мире [109]. Согласно проведенным исследованиям, порядка 40% инвесторов в мире уже используют инструменты ответственного



инвестирования [309]. В то же время в России интерес к использованию зеленых финансовых инструментов только начинает проявляться: первые в истории страны «зеленые» облигации были размещены на Московской бирже в декабре 2018 года. Однако в целях повышения энергоэффективности российской экономики и решения экологических проблем необходимо появление разных финансовых продуктов, в том числе кредитных и страховых. Необходимость формирования национальной системы финансовых инструментов устойчивого развития обозначена в «Основных направлениях развития финансового рынка Российской Федерации на период 2019-2021 гг.», и в настоящее время под эгидой Банка России ведется работа над разработкой национальных правил и стандартов для верификации зеленых финансовых инструментов.

Еще одним способом формирования новой неформальной институциональной среды, способствующей транзиту к устойчивой экономике в целом и устойчивой энергетике в частности, является развитие университетских образовательных программ, а именно внедрение в образовательный процесс программ ответственного управленческого образования («responsible management education»). Базисом ответственного управленческого образования являются принципы концепции устойчивого развития. Являясь одним из центров социально-экономического развития, посредством изменения образовательных программ университет чутко реагирует на изменение общественных запросов. Задачей внедрения принципов ответственного управленческого образования является подготовка специалистов, способных принимать управленческие решения в условиях необходимости согласования интересов отдельных компаний и общества в целом с положительными долгосрочными эффектами для глобальной экономики. Понимание новой бизнес-реальности и необходимости экономической, социальной и экологической ответственности, продвижение использования инновационных проектов и практик, изучение особенностей устойчивого менеджмента и тенденций развития цифрового общества, будут

стимулировать появление и внедрение новых бизнес-моделей, способствующих устойчивому социально-экономическому развитию и повышению качества жизни. Именно новые университетские программы будут распространять принципы и ценности «ответственного управления», которые имеют большое значение для создания институциональной среды, благоприятной для становления устойчивой энергетики.

Изменение институциональной среды в числе прочего будет влиять и на выбор и реализацию инвестиционных проектов в энергетике. С учетом предложенных направлений изменения институциональной среды будут отбираться инвестиционные проекты, в большей степени соответствующие принципам устойчивого развития (рис. 5.14).



Рисунок 5.14 – Взаимосвязь между направлениями изменения институциональной среды и этапами жизненного цикла инвестиций

Источник: составлено автором

Изменение институциональной среды в соответствии с принципами концепции устойчивого развития будет способствовать решению проблем

обеспечения энергетической безопасности посредством стимулирования изменений в структуре энергетических систем, что повысит адаптивные свойства национальной энергетической системы и уменьшит риски снижения качества жизни населения вследствие реализации угроз энергетической безопасности (рис. 5.15).



Рисунок 5.15 – Место изменения институциональной среды в процессе решения проблем обеспечения энергетической безопасности

Источник: составлено автором

В настоящее время российская энергетика находится на перекрестке двух дорог: одна дорога обеспечивает стабильный среднесрочный экономический рост за счет дальнейшего развития традиционной энергетики, ориентированной на экспорт нефти и газа, другая - закладывает основы долгосрочного процветания российского общества за счет развития устойчивой экономики в целом и устойчивой энергетики в частности. Преимущества устойчивой

энергетики заключаются в ее ориентированности на рост экономического благосостояния и психологический комфорт населения за счет решения экологических проблем, развития более безопасных способов производства и транспортировки энергии и снижения уязвимости энергетических систем к реализации разного рода стрессовых ситуаций. Под действием ряда факторов в России к настоящему моменту сформировались устойчивые социально-экономические институты, затормаживающие процесс трансформации национальной энергетики. В связи с этим отдельные инициативы, направленные на реализацию тех или иных конкретных проектов развития возобновляемой энергетики или на разработку и внедрение зеленых технологий, не могут стать основой долгосрочного процесса энергетического перехода. Для радикальной смены текущей парадигмы развития российской энергетики должна быть проведена серьезная работа по изменению институциональной среды функционирования российских энергетических компаний.

**Выводы по пятой главе.** Было показано, что в настоящее время дискурс проблемы обеспечения роста качества жизни населения был расширен вопросами качества и безопасности поставок энергетических ресурсов. Предложен подход к интерпретации стратегических угроз энергетической безопасности как рисков снижения качества жизни населения в результате уменьшения объемов поставляемых энергетических ресурсов. На основе предложенного подхода разработан метод количественной оценки рисков снижения качества жизни населения в результате реализации угроз энергетической безопасности. Используя предложенную схему оценки последствий риска снижения качества жизни населения за счет реализации стратегических угроз энергетической безопасности, а также результаты оценки макроэкономических последствий реализации такой стратегической угрозы энергетической безопасности, как дефицит инвестиций в электроэнергетику, приведенные в четвертой главе диссертационного исследования, были получены следующие результаты. Падение доходов населения в долгосрочном

периоде (при условии сохранения текущей численности населения и структуры распределения доходов) составит до 1,9% (при дефиците инвестиций 4%).

Развитие подхода к исследованию стратегических угроз энергетической безопасности как рисков снижения качества жизни населения имеет как практическое, так и теоретическое значение. Расширение научного знания о роли энергетических ресурсов и энергетических систем в процессе обеспечения роста качества жизни населения в современных условиях особенно актуально для России с ее развитым топливно-энергетическим комплексом и большим запасом углеводородов. Выделение и анализ рисков снижения качества жизни населения в результате реализации угроз энергетической безопасности, а также исследование механизма их влияния на уровень экономического благосостояния и качество жизни населения обеспечат развитие методического инструментария снижения рисков реализации стратегических угроз энергетической безопасности страны и оценки ее уровня. Развитие методического инструментария, в свою очередь, будет способствовать разработке более эффективных мероприятий, направленных на повышение устойчивости ТЭК к стратегическим угрозам энергетической безопасности, способным оказать негативное воздействие на качество жизни населения, а также интеграции этих мероприятий в программы социально-экономического развития страны.

Было показано, что снижение влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения может быть осуществлено за счет развития устойчивой энергетики. Обоснована необходимость ускорения процесса становления в России устойчивой энергетики за счет повышения эффективности энергетических технологий и развития возобновляемых источников энергии. Было показано, что, несмотря на проведенную реформу по либерализации российской электроэнергетики, направленную в числе прочего на повышение эффективности российской энергетики и создание благоприятных условий для внедрения технологий использования

возобновляемых источников энергии, основные барьеры на пути развития в России устойчивой энергетики до сих пор не преодолены.

В условиях осознанной необходимости развития устойчивой энергетики актуальной становится задача изменения траектории развития национальной экономики с учетом существования сильных экономических стимулов к использованию традиционных источников энергии. Был сделан вывод о том, что, поскольку траектория развития экономических систем определяется не только текущей структурой относительных цен и инвестиционных стимулов, но и сложившейся системой общественно-экономических институтов, в целях становления в России устойчивой энергетики необходимо создание благоприятной институциональной среды, учитывающей усложнение взаимосвязей экономики и энергетики, рост неопределенности, а также смещение акцентов при планировании экономического и энергетического развития на показатели качества жизни населения.

На основе анализа особенностей исторически сложившейся институциональной среды, стимулирующей эффективное функционирование и развитие в России крупных энергетических компаний-монополистов, обладающих высокой инерционностью своего развития, предложены основные направления изменения институциональной среды, способствующие становлению устойчивой энергетики и обеспечению высокого уровня качества жизни населения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные теоретические и практические результаты исследования, полученные в области функционирования больших систем энергетики в условиях возрастания рисков реализации угроз энергетической безопасности страны и направленные на развитие существующих методов принятия оптимальных решений в ТЭК в целях решения задач обеспечения энергетической безопасности страны, дополняют результаты передовых мировых исследований в области управления энергетическими системами. В ходе проведенного диссертационного исследования получены следующие основные результаты.

1. Выделены этапы эволюции концепции энергетической безопасности и выявлены основные факторы, ее определяющие.

Изучение процесса зарождения концепции энергетической безопасности и ее дальнейшей трансформации, а также изменения содержания понятия энергетической безопасности имеет важное значение для решения проблем обеспечения энергетической безопасности страны. Изменение смыслового содержания понятия энергетической безопасности было рассмотрено на фоне происходящих исторических событий и анализа социально-экономической ситуации в тот или иной период. Усложнение взаимосвязей экономики и энергетики, увеличение неопределенности условий функционирования топливно-энергетического комплекса, рост политических и экономических рисков, развитие и быстрое внедрение новых технологий в области добычи и переработки энергетических ресурсов обуславливают дальнейшее развитие концепции энергетической безопасности и появление новых инструментов решения проблем обеспечения энергетической безопасности.

2. Сделан вывод о разнице в подходах к оценке и в способах обеспечения энергетической безопасности между странами нетто-импортерами и нетто-экспортерами энергетических ресурсов.

Исследование показало, что страны – нетто-импортеры энергетических ресурсов, экономика которых характеризуется высокой степенью диверсификации и экологичности, акцентируют внимание на процессах транспортировки и потребления энергетических ресурсов. Проблемы преобразования энергетических ресурсов в электроэнергию и тепловую энергию, а также их распределения внутри страны являются вторичными в рамках решения проблем обеспечения энергетической безопасности. Статус нетто-импортера энергетических ресурсов смещает акцент в решении проблем обеспечения энергетической безопасности на анализ положения стран-поставщиков, надежность поставок энергетических ресурсов, диверсификацию энергобаланса, развитие возобновляемых источников энергии, и на снижение рисков возможных перебоев в поставках энергоресурсов.

Для России – нетто-экспортера, который обладает одними из самых больших запасов углеводородов и при этом имеет обширные территории с неравномерным распределением населения, наиболее актуальными этапами процесса производства и потребления энергии при решении проблем обеспечения энергетической безопасности являются этапы преобразования и транспортировки энергетических ресурсов. В этой связи решение задачи обеспечения долгосрочной энергетической безопасности России лежит в области обеспечения долгосрочного сбалансированного развития ТЭК.

3. Обоснована необходимость интеграции в алгоритм обеспечения долгосрочной энергетической безопасности страны таких элементов, как анализ неопределенности и рисков, анализ адаптивности, анализ инвестиционной привлекательности экономики и энергетики и анализ влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения.

Современные условия функционирования энергетических компаний характеризуются ростом неопределенности и рисков вследствие усиления геополитической напряженности, ускорения научно-технического прогресса, продолжающейся интеграции реальных и финансовых рынков, роста



экологических требований, роста конкуренции на международных рынках энергетических ресурсов в результате выхода на них новых игроков и т.д.

В ходе исследования было установлено, что последствия негативного воздействия неопределенности и рисков реализации угроз энергетической безопасности могут быть минимизированы с помощью такого свойства развивающихся открытых систем, как адаптивность. Поскольку адаптационные мероприятия могут требовать привлечения инвестиционных ресурсов, управление адаптивными свойствами энергетических систем в контексте решения проблем обеспечения долгосрочной энергетической безопасности должно осуществляться совместно с формированием инвестиционного климата, благоприятного для обеспечения топливно-энергетического комплекса инвестиционными ресурсами, необходимыми для финансирования адаптационных мероприятий.

На основе анализа текущих тенденций развития экономики и энергетики страны сделан вывод о необходимости включения в алгоритм решения проблем обеспечения долгосрочной энергетической безопасности вопросов снижения влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения.

4. Уточнен перечень факторов, определяющих уровень адаптивности энергетических систем в современных условиях.

Фундаментальные изменения, происходящие в мировой энергетике, оказывают значительное влияние на факторы, определяющие адаптивность энергетических систем. Ранее эффективность и адаптивность энергетических систем базировались на наличии больших резервов как производственных мощностей, так и энергетических ресурсов. В настоящее время производственные и ресурсные резервы, оставаясь значимыми для обеспечения надежности функционирования энергетических систем, утратили свою первостепенность в обеспечении адаптивности. На первый план в повышении гибкости и устойчивости энергетических систем все больше выходят факторы, ассоциируемые с устойчивой энергетикой: диверсификация видов

потребляемых энергетических ресурсов; диверсификация структуры генерирующих мощностей по типу энергостанций; диверсификация поставщиков энергетических ресурсов; рост энергоэффективности производств и, как следствие, снижение энергоемкости экономики; развитие возобновляемых источников энергии и др.

5. Сформулированы принципы добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему при разработке энергетической политики, направленной на увеличение адаптивности национальной энергетической системы. Выделены и описаны методы прямого и косвенного управляющего воздействия на национальную энергетическую систему, позволяющие повышать уровень ее адаптивности.

Национальная энергетическая система представляет собой сложную динамическую систему, развитие которой обусловлено как внутренними процессами в самой системе, так и экзогенными факторами управляющего воздействия на нее со стороны самостоятельных акторов, приводящими к появлению новых элементов и взаимосвязей в рамках рассматриваемой системы. Появление новых элементов национальной энергетической системы может приводить как к росту уязвимости системы, так и к росту ее адаптивных свойств. Проведенное исследование позволило сформулировать ключевые принципы добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему в процессе разработки энергетической политики, направленной на увеличение адаптивности национальной энергетической системы при росте ее сложности в условиях цифровизации и появления новых источников энергии.

6. Разработан метод оценки уровня адаптивности и рискованности альтернативных вариантов долгосрочного развития энергетических систем с целью повышения обоснованности принимаемых стратегий энергетического развития.

В ходе исследования было показано, что критерий адаптивности вариантов развития национальной энергетической системы может и должен быть

использован при анализе вариантов развития ТЭК. Для этого был разработан метод оценки уровня адаптивности и эффективности альтернативных вариантов долгосрочного развития энергетической систем, повышающий обоснованность принимаемых решений в энергетике за счет появления нового инструмента выбора стратегии из имеющихся альтернатив. Проведенные расчеты показали возможность использования разработанного метода в качестве дополнительного инструмента в процессе разработки и обоснования стратегии развития энергетических систем.

7. Раскрыта роль инвестиций в энергетику в процессе формирования адаптивных свойств энергетических систем.

Инвестиции выступают необходимым ресурсом, обеспечивающим поступательное развитие и трансформацию национальной энергетической системы, что приводит к росту ее адаптивных свойств. На основе сформулированных принципов добавления новых элементов и взаимосвязей в национальную энергетическую систему были выделены основные направления положительного влияния инвестиций на адаптивные свойства энергетических систем.

8. Раскрыт механизм долгосрочного самоусиливающегося процесса развертывания стратегической угрозы дефицита инвестиций в энергетике, сопровождающегося падением адаптивных свойств энергетических систем. Проанализированы макроэкономические последствия дефицита инвестиций.

Ввиду особой роли инвестиций в решении проблем обеспечения долгосрочной энергетической безопасности и формировании адаптивных свойств энергетических систем было проведено исследование последствий реализации угрозы дефицита инвестиций в ТЭК, выявившее наличие долгосрочного самоусиливающегося процесса развертывания стратегической угрозы дефицита инвестиций, обусловленного взаимным влиянием фундаментальных процессов, протекающих в мировой энергетике и экономике, и ростом неопределенности и рисков функционирования отечественной экономики и энергетики. Было показано, что дефицит поставляемых

энергетических ресурсов неминуемо приводит к отставанию развития национальной энергетики от потребностей экономики. В случае отставания развития национальной энергетики от потребностей экономики опережающий рост потребностей экономики в энергии над ростом производственных мощностей ТЭК будет приводить к росту цен на энергоносители, замедлению темпов экономического развития и снижению уровня энергетической безопасности страны. Длительное недофинансирование сектора электроэнергетики может вызвать крупномасштабный дефицит электроэнергии и неблагоприятные последствия во всех секторах экономики и социальной сфере.

9. Исследование свойства адаптивности сложных динамических систем с применением инструментов маржинального анализа, используемых при принятии управленческих решений, позволило выявить и описать свойство адаптивности инвестиционных проектов в ТЭК в контексте влияния реализации отдельных крупномасштабных проектов капиталовложений на адаптивные свойства энергетических систем.

Был предложен и апробирован метод учета предельных цен на энергоносители при анализе эффективности инвестиционных проектов, позволяющий повысить обоснованность принимаемых инвестиционных решений в энергетике за счет учета возможного колебания рыночной цены на энергоресурсы в их предельных значениях.

10. Выявлены механизмы влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения. Предложен показатель оценки рисков снижения качества жизни населения в результате реализации стратегических угроз энергетической безопасности.

Предложен подход к интерпретации стратегических угроз энергетической безопасности как рисков снижения качества жизни населения в результате уменьшения объемов поставляемых энергетических ресурсов. На основе предложенного подхода разработан метод количественной оценки рисков снижения качества жизни населения в результате реализации угроз

энергетической безопасности. Используя предложенную схему оценки последствий риска снижения качества жизни населения за счет реализации стратегических угроз энергетической безопасности, а также результаты оценки макроэкономических последствий реализации такой стратегической угрозы энергетической безопасности, как дефицит инвестиций, была осуществлена оценка возможного падения доходов населения в долгосрочном периоде.

11. Обоснована возможность снижения влияния угроз энергетической безопасности на качество жизни населения за счет развития устойчивой энергетики.

Развитие новых организационных структур в энергетике, внедрение новых информационных технологий, диверсификация энергетического баланса и т. д., являясь следствием развития устойчивой энергетики, позволяют создать механизмы, которые будут трансформировать самоусиливающийся процесс возникновения и реализации стратегических угроз энергетической безопасности, приводящий к снижению качества жизни населения.

В условиях осознанной необходимости развития устойчивой энергетики актуальной становится задача изменения траектории развития национальной экономики с учетом существования сильных экономических стимулов к использованию традиционных источников энергии. Был сделан вывод о том, что, поскольку траектория развития экономических систем определяется не только текущей структурой относительных цен и инвестиционных стимулов, но и сложившейся системой общественно-экономических институтов, в целях становления в России устойчивой энергетики необходимо создание благоприятной институциональной среды, учитывающей усложнение взаимосвязей экономики и энергетики, рост неопределенности, а также смещение акцентов при планировании экономического и энергетического развития на показатели качества жизни населения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. №216 «Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации».
2. Постановление Правительства Российской Федерации №335 от 28 марта 2019 г. Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики».
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2035 года» (с изменениями на 24 марта 2022 года).
4. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
5. «Прогноз научно-технического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года»: Утвержден Министерством энергетики РФ 14 октября 2016 г.
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года».
7. Аганбегян А. Г. ТЭК России – будущее с учетом требований устойчивого развития и геополитической обстановки // Научные труды вольного экономического общества России. 2022. № 4. С. 359-383.
8. Азиатская часть России: моделирование экономического развития в контексте опыта истории / отв. ред. В. А. Ламин, В. Ю. Малов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 464 с.
9. Антонов Г. Н. Методы и модели исследования живучести систем энергетики / Г. Н. Антонов, Г. Н. Черкесов, Л. Д. Криворучский – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. 285 с.

10. Афанасьев А. А., Баранов Н. Н. Мировая энергетика: глобальные проблемы и перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 2. С. 28-47.

11. Баранов Н. Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 384 с.

12. Башмаков И. А., Мышак А. Д. Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 года // Вопросы экономики. 2014. № 8. С. 70-91.

13. Башмаков И. А. Налог на углерод в системе налогов на энергию и экологических налогов // Экологический вестник России. 2018. №3. С. 1-13.

14. Башмаков И. А. Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. № 2. С. 151-174.

15. Башмаков И. А. Энергетика мира: мифы прошлого и уроки будущего / И. А. Башмаков // Вопросы экономики. 2018. №4. С. 49-75.

16. Белик И. С., Камдина Л. В. Влияние энергетического фактора на качество жизни домохозяйств // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки. 2017. № 4. С. 18-22.

17. Беляев Л. С. Проблемы электроэнергетического рынка – Новосибирск: Наука, 2009. 296 с.

18. Беляев Л. С. Решение задач развития генерирующих мощностей электроэнергетических систем с учетом неопределенности исходной информации / Л. С. Беляев, Г. В. Войцеховская, Н. Т. Ефимов, В. А. Савельев // Фактор неопределенности при принятии оптимальных решений в больших системах энергетики. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1974. 184 с.

19. Бессель В. В. О перспективах развития глобальной энергетики и ее влиянии на энергетическую безопасность России // Бурение и нефть. 2021. № 5. С. 44-53.

20. Борталевич С. И. Пути обеспечения устойчивого энергетического развития региональных экономических систем в рамках управления энергетической безопасностью региона // Проблемы рыночной экономики. 2015. №1. С. 41-46.

21. Бушуев В. В. О доктрине энергетической безопасности России / В. В. Бушуев, Н. И. Воропай, С. М. Сендеров, В. В. Саенко // Экономика региона. 2012. №2. С. 40-50.

22. Бушуев В. В. Энергетика России. – М.: Издательско-аналитический центр «Энергия», 2018. 740 с.

23. Быкова Е. В. Методы расчета и анализа показателей энергетической безопасности. – Кишинев, Изд-во АН РМ, 2005. 156 с.

24. Быкова Е. В., Гродецкий М. В. Анализ и мониторинг энергетической безопасности и прогнозирование значений индикаторов методом условного нелинейного математического программирования // Экономика региона. 2011. №3. С. 234-240.

25. Быкова Е. В. Инвестиции как инструмент обеспечения энергетической безопасности Молдовы // Экономикс. 2013. №3. С. 47-61.

26. Васильев Ф. П. Методы оптимизации: в 2-х книгах. Книга 1. – М.: МЦНМО, 2011. 620 с.

27. Веселов Ф. В., Соляник А. И. Условия развития электроэнергетики России в рамках жестких ценовых ограничений в среднесрочной перспективе // Проблемы прогнозирования. 2020. №1. С. 88-98.

28. Виленский П. Л. Об одном подходе к учету влияния неопределенности и риска на эффективность инвестиционных проектов // Вопросы экономики. 2002. №4. С. 24-31.

29. Виленский П. Л. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика / П. Л. Виленский, В. Н. Лившиц, С. А. Смоляк. – М.: Дело, 2001. 832 с.



30. Волкова Е. А. Перспективы развития атомных электростанций до середины XXI века / Е. А. Волкова, А. А. Макаров, А. С. Макарова, А. А. Хоршев, Е. И. Шаров. – М.: ИНЭИ РАН, 2010. 212 с.
31. Волконский В. А., Кузовкин А. И. Ценовые и финансовые проблемы топливно-энергетического комплекса. – М.: Наука, 2008. 254 с.
32. Ворожцова Т. Н., Пяткова Н. И. Онтологическая модель угроз энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №3(7). С. 35-42.
33. Воронин А. Ю., Маликова О. И. Глобализация энергетических рынков и экономический рост в России. – СПб: ООО «Издательско-полиграфическая компания КОСТА», 2010. 240 с.
34. Воропай Н. И., Иванова Е. Ю. Обоснование развития электроэнергетических компаний в условиях несовпадающих интересов субъектов отношений // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2003. №2. С. 39-51.
35. Воропай Н. И. Региональные проблемы энергетической безопасности России // Известия академии наук. Энергетика. 1999. №3. С. 47-55.
36. Воропай Н. И., Сендеров С. М. Энергетическая безопасность: Сущность, основные проблемы, методы и результаты исследований // Материалы открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса». М.: ИНП РАН, 2011. 89 с.
37. Гальперова Е. В., Мазурова О. В. Энергоемкость мировой экономики: тенденции и прогнозы // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. №9. С. 27-31.
38. Гамм А. З. Теоретические основы системных исследований в энергетике / А. З. Гамм, А. А. Макаров, Б. Г. Санеев и др. – Новосибирск: Наука, 1986. 336 с.
39. Гафуров А. Р. Сущность категории "энергетическая безопасность" и её место в общей структуре безопасности // Вестник МГТУ. 2010. Т.13, №1. С.178-182.

40. Гафуров А. Р. Формирование системы управления энергетической безопасностью на региональном уровне // Экономика и управление. 2009. № 9. С. 40-44.
41. Гилбоа И. Вероятность и неопределенность в экономическом моделировании / И. Гилбоа, Э. Постлуэйт, Д. Шмайдлер // Вопросы экономики. 2009. №10. С. 46-61.
42. Глушакова О. В. Эволюция методологии и теории качества жизни в концепциях зарубежных и отечественных научных школ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2006. №3. С. 141-147.
43. Гранберг А. Г. Математические модели социалистической экономики. – М.: Экономика, 1978. 351 с.
44. Горелик В. А., Золотова Т. В. О некоторых функциях риска и их применении в инвестиционных задачах // Управление риском. 2011. №3. С. 59-64.
45. Гэри Дж. Г. Технологии и экономика нефтепереработки / Дж. Г. Гэри, М. Дж. Кайзер, Г. Е. Хэндверк. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2013. 440 с.
46. Демина О. В. Возможности и проблемы развития энергетической кооперации в странах СВА в условиях политической нестабильности и энергоперехода // Пространственная экономика. 2022. №3. С. 194-196.
47. Дмитриевский А. Н. Энергетические приоритеты и безопасность России (нефтегазовый комплекс) / А. Н. Дмитриевский, А. М. Мастепанов, М. В. Кротова. – М: ООО «Газпром экспо», 2013. 336 с.
48. Дремова Л. А. Особенности механизма функционирования естественных монополий в транзитивной экономике – Курск: Изд-во Курского гос. ун-та, 2012. 236 с.
49. Дронова Ю. В. Основы учета рисков при разработке перспективных прогнозов электропотребления // Энергетика России в XXI веке: стратегия развития – восточный вектор. Энергетическая кооперация в Азии: что после кризиса? – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. С. 672-676.

50. Еделев А. В. Распределённая вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур в энергетике / А. В. Еделев, С. М. Сендеров, Н. М. Береснева, И. А. Сидоров, А. Г. Феоктистов // Системы управления, связи и безопасности. 2018. №3. С. 197-231.

51. Егорченко Т. И. Роль энергетической безопасности в контексте современных проблем социально-экономического развития // Экономика и управление. 2011. №2. С. 99-102.

52. Живетин В. Б. Риски и безопасность экономических систем (математическое моделирование). – М.: Изд-во Института проблем риска, ООО Информационно-издательский центр «Бон Анца», 2008. 440 с.

53. Жизнин С. З., Тимохов В. М. Международная энергетическая безопасность и модернизация ТЭК России // Энергетическая политика. 2011. №6. С. 21-29.

54. Жуковский В. И. Риск в многокритериальных и конфликтных системах при неопределенности / В. И. Жуковский, Л. В. Жуковская; под ред. В. С. Молостова. – М.: Едиториал УРСС, 2004. 272 с.

55. Зяблицкий И. Е. Оценка фискальных мультипликаторов в российской экономике // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2020. №2. С. 268-294.

56. Игнатьева А. В., Максимцов М. М. Исследование систем управления. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 176 с.

57. Исследование экономики России с использованием моделей с нечеткими параметрами / под ред. А. О. Баранова, В. Н. Павлова. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2009. 236 с.

58. Как избежать ресурсного проклятия / под ред. Дж. Сакса, Дж. Стиглица, М. Хамфриса. – М.: Изд-во Института Гайдара, 2011. 464 с.

59. Карамов Д. Н. Анализ мирового опыта стимулирования развития возобновляемой энергетики и возможностей его применения в России / Д. Н. Карамов, И. А. Мальцев, П. В. Илюшин и др. // Энергетик. – 2022. – № 9. – С. 39-49.

60. Карпович А. И. Моделирование экономической устойчивости систем энергетики. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 260 с.

61. Карпович А. И. Определение категории устойчивости в сложных социтехнических системах / А. И. Карпович, А. В. Никифорова, А. Н. Полетайкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2017. №1. С. 147-163.

62. Кибалов Е. Б., Кин А. А. Проблемы учета фактора неопределенности при оценке ожидаемой эффективности крупномасштабных инвестиционных проектов // Регион. 2007. №3. С. 67-91.

63. Кибалов Е. Б. Системный анализ ожидаемой эффективности крупномасштабных проектов / Е. Б. Кибалов, В. И. Горяченко, А. Б. Хуторецкий. – Новосибирск: Изд-во ИЭОПП РАН, 2008. 164 с.

64. Кини Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа; под ред. И. Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. 560 с.

65. Кирдина С. Г. Институциональные матрицы и развитие России. – Новосибирск: ИЭ и ОПП СО РАН, 2001. 301с.

66. Колибаба В. И., Жабин К. В. Организационно-экономический механизм формирования рынка реактивной мощности в электроэнергетики. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2021. 184 с.

67. Кокошин А. А. Международная энергетическая безопасность. – М.: Европа, 2006. 70 с.

68. Кононов Ю. Д. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю. Д. Кононов, Е. В. Гальперова, Д. Ю. Кононов, А. В. Лагерева, О. В. Мазурова, В. Н. Тыртышный. — Новосибирск: Наука, 2009. 178 с.

69. Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Оценка и учет инвестиционных рисков при прогнозных исследованиях развития ТЭК // Проблемы анализа риска. 2018. №2. С. 72-77.
70. Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Свойство инерционности ТЭК и методический подход к его исследованиям. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. 44 с.
71. Кононов Ю. Д. Энергетика и экономика: проблемы перехода к новым источникам энергии. – М.: Наука, 1981. 188 с.
72. Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Экономическая составляющая энергетической безопасности и методические подходы к ее оценке // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. Т. 15, №6. С. 927–941.
73. Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Особенности учета состояния энергетической безопасности при многокритериальной оценке вариантов развития топливно-энергетического комплекса // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2022. № 5(410). С. 977-990.
74. Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Оценка конкуренции электростанций // Электрические станции. 2009. №6. С. 22-27.
75. Кондраков О. В. Мониторинг как элемент обеспечения энергетической безопасности региона // Социально-экономические явления и процессы. 2012. №3. С. 50-54.
76. Кондраков О. В. Определение пороговых значений индикаторов энергетической безопасности // Вестник Тамбовского государственного университета. Серия: Гуманитарные науки. 2013. № 9(125). С. 64-70.
77. Кондраков О. В. Показатели оценки энергетической безопасности региона // Вестник ТГУ. 2013. №5. С. 64-69.
78. Кондраков О. В. К вопросу о проблеме энергетической безопасности региона и развития энергетики // Социально-экономические явления и процессы. 2012. №4(38). С. 73-78.

79. Кондраков О. В. Классификация угроз энергетической безопасности региона // Социально-экономические явления и процессы. 2012. №7. С.85-89.

80. Конторович А. Э. Главные направления развития нефтяного комплекса России в первой половине XXI века / А. Э. Конторович, Л. М. Бурштейн, В. Р. Лившиц, С. В. Рыжкова // Вестник Российской академии наук. 2019. №11. С. 1095-1104.

81. Коржубаев А. Г., Эдер Л. В. Нефтегазовый комплекс России: состояние, проекты, международные отношения. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2011. 296 с.

82. Коржубаев А. Г. Энергообеспечение стран тихоокеанского клуба / А. Г. Коржубаев, И. А. Соколова, И. В. Филимонова. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2012. 344 с.

83. Королев В. Ю. Математические основы теории риска / В. Ю. Королев, В. Е. Бенинг, С. Я. Шоргин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 620 с.

84. Коростышевская Е. М. Инновационная составляющая экономической безопасности России // Инновации. 2014. № 6(188). С. 34-38.

85. Кривоножко В. Е., Лычев А. В. Моделирование и анализ деятельности сложных систем – М.: ЛЕНАНД, 2013. 256 с.

86. Кризис 2010-х годов и Новая энергетическая цивилизация / под ред. В. В. Бушуева, М. Н. Муханова. – М.: ИД «Энергия», 2013. 272 с.

87. Кротов М. И., Мунтиян В. И. Экономическая безопасность России: системный подход – Санкт-Петербург: НПК «РОСТ», 2016. 336 с.

88. Куснер Ю. С., Царев И. Г. Принципы движения экономической системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 200 с.

89. Кучаев А. И. Предложения по повышению эффективности системы энергобезопасности в современных условиях // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. №4. С. 13-24.

90. Лившиц В. Н. Современные проблемы оценки эффективности инвестиционных проектов / В. Н. Лившиц; открытый семинар «Экономические

проблемы энергетического комплекса». – М.: Институт народнохозяйственного прогнозирования, 2000. 60 с.

91. Лисочкина Т. В. Экономико-математические методы и модели принятия решений в энергетике / Т. В. Лисочкина, Э. М. Косматов, А. Ирешова и др.; под ред. П. П. Долгова, И. Климы. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1991. 224 с.

92. Локтионов В. И. Адаптивность вариантов развития энергетических систем как показатель энергетической безопасности // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 40(2015). С. 11-21.

93. Локтионов В. И. Анализ уровня допустимой погрешности исходных данных в процессе управления энергетическими системами // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 8(455). С. 43-54.

94. Локтионов В. И. Влияние неопределенности исходных данных на варианты долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 31(2015). С. 51-60.

95. Локтионов В. И. Влияние инвестиционных проектов на уровень адаптивности энергетических систем в задачах долгосрочного прогнозирования // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 4(451). С. 46-56.

96. Локтионов В. И. Инвестиционная привлекательность ТЭК региона как аспект энергетической безопасности // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 18(207). С. 44-49.

97. Локтионов В. И. Использование мирового опыта в оценке энергетической безопасности применительно к России // Энергетическая политика. 2013. №3. С. 3-9.

98. Локтионов В. И. Методологическое обоснование разработки системы мероприятий, направленных на повышение адаптивности национальной энергетической системы // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. Т. 15, №7. С. 1305–1324.

99. Локтионов В. И. Новый инвестиционный цикл: современные финансовые механизмы развития энергетики // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2021. №5. С. 64-77.

100. Локтионов В. И. Оценка рискованности и эффективности вариантов реализации национальной энергетической стратегии // Управление риском. 2020. №1. С. 47-55.

101. Локтионов В. И., Кононов Ю. Д. Оценка рисков в предпринимательстве при анализе эффективности крупномасштабных проектов в ТЭК. – Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2012. 143 с.

102. Локтионов В. И. Оценка эффективности инвестиционных проектов в энергетике с учетом предельных цен на энергоносители // Экономический анализ: теория и практика. 2014. №33. С. 17-22.

103. Локтионов В. И. Принципы и критерии оценки адаптивности энергетических систем // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13, № 12. С. 2335-2348.

104. Локтионов В. И. Россия на пути к устойчивой энергетике // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, №4. С. 725-740.

105. Локтионов В. И. Свойство адаптивности как критерий эффективности инвестиционных проектов в топливно-энергетическом комплексе // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 6(309). С. 46-50.

106. Локтионов В. И. Стратегические угрозы энергетической безопасности как риски снижения качества жизни населения // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2020. Т. 16, № 4. С. 730-744.

107. Локтионов В. И. Эволюция концепции энергетической безопасности // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. Т. 15, №5. С. 927–941.

108. Локтионов В. И. Устойчивая энергетика как инструмент снижения влияния реализации угроз энергетической безопасности на качество жизни населения // Baikal Research Journal. 2020. Т. 11, № 4.



109. Локтионов В. И., Локтионова Е. А. Экономико-энергетические системы: эволюция структурных связей в период перехода к новой парадигме социально-экономического развития // Известия Байкальского государственного университета. 2021. Т. 31, № 3. С. 303–313.

110. Локтионов В. И., Мазурова О. В. Дефицит инвестиций как стратегическая угроза энергетической безопасности России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, № 7. С. 1305-1318.

111. Локтионов В. И., Мазурова О. В., Гальперова Е. В. Перспективная оценка спроса на электроэнергию в РФ и регионах с учетом углубленной электрификации // Экономика региона. 2022. Т. 18, №2. С. 528-541.

112. Львов Д. С. Экономика развития. – М.: Экзамен, 2002. 512 с.

113. Майбуров И. А. Перспективы совершенствования экологического налогообложения / И. А. Майбуров, Ю. Б. Иванов, Ж. И. Лялина // Инновационное развитие экономики. 2018. № 4(46). С. 7-13.

114. Макаров А. А., Веселов Ф. В. Исследование адаптации энергетики России к посткризисному развитию экономики. – М.: АО «Издательский дом МЭИ», 2018. 184 с.

115. Макаров А. А., Мелентьев Л. А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. – Новосибирск: Наука, 1973. 276 с.

116. Макаров А. А. Прогноз мировой энергетики и последствия для России / А. А. Макаров, Т. А. Митрова, В. А. Малахов // Проблемы энергетики. 2013. №6. С. 17-29.

117. Макарова Г.Н. Экономические риски: структура и методы управления. – Иркутск: Изд. ИГЭА, 1999. 120 с.

118. Маликова О. И. Отраслевая структура и конкуренция на мировом рынке энергоносителей / О. И. Маликова, В. В. Вутянов, А. Б. Давыденко, В. И. Чалов. – М: МАКС Пресс, 2012. 204 с.

119. Марковская Е. И. Теоретические и практические аспекты формирования механизмов адаптации экономических субъектов / Е. И. Марковская. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭУ, 2017. 150 с.

120. Массель Л. В., Пяткова Е. В. Анализ угроз энергетической безопасности с применением байесовских сетей доверия // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надёжности либерализованных систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. С. 439-446.

121. Массель Л. В. Адаптация методов ситуационного управления для решения задач оценки влияния угроз на состояние энергетической безопасности / Л. В. Массель, Н. И. Пяткова, А. Г. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №1. С. 28-38.

122. Массель Л. В., Пяткова Е. В. Применение байесовских сетей доверия для интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности // Вестник ИрГТУ. 2012. № 2(61). С. 8-13.

123. Мастепанов А. М. Проблемы обеспечения энергетической безопасности в условиях высокой геополитической, экологической, экономической и технологической неопределенности / А. М. Мастепанов, В. В. Бушуев, Н. И. Воропай и др. // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности: тезисы Всероссийской научной конференции, посвященной 30-летию ИПНГ РАН, 2017. С. 108-109.

124. Медницкий В. Г. Крупномасштабные инвестиционные проекты: Моделирование и экономическая оценка / В. Г. Медницкий, Р. В. Фаттахов, С. П. Бушанский; отв. ред. Ю. В. Овсиенко. – М.: Наука, 2003. 264 с.

125. Мелентьев Л. А., Штейнгауз Е. О. Экономика энергетики СССР. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 431 с.

126. Мелентьев Л. А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. – М.: Наука, 1979. 415 с.

127. Методы и модели согласования иерархических решений / отв. ред. А. А. Макаров. – Новосибирск: Наука, 1979. 240 с.

128. Миэринь Л. А. Безопасность хозяйствующих субъектов в условиях нестабильной среды. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет экономики и финансов, 1999. 207 с.

129. Миэринь Л. А., Марковская Е. И. Количественный подход к оценке адаптивности экономических субъектов // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2021. № 1(127). С. 27-34.

130. Миэринь Л. А., Хорева Л. В. Стратегии социальных инноваций и риски их игнорирования // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2022. № 3(66). С. 51-62.

131. Модернизация промышленности и развитие высокотехнологичных производств в контексте «зеленого» роста / Б. Н. Порфирьев, А. Ю. Колпаков, В. В. Семикашев, Ю. В. Синяк и др.; отв. ред. Б. Н. Порфирьев– М.: ООО «Научный консультант», 2017. 434 с.

132. Можаяева С. В. Экономика энергетического производства / С. В. Можаяева. – СПб: Изд-во «Лань», 2011. 272 с.

133. Мунтиян В. И., Бочаров В. Е. Экономические предпосылки обеспечения финансовой безопасности // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. № 11. С. 83-95.

134. Мызин А. Л. Сравнительная оценка энергоинвестиционной привлекательности регионов: метод и апробация / А. Л. Мызин, П. Е. Мезенцев, О. А. Денисова, П. А. Пыхов // Экономика региона. 2007. №4. С. 207-220.

135. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения / отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2014. 283 с.

136. Национальные счета России в 2013-2020 годах: Стат. сб./ Н35 Росстат. - М.: 2021. 429 с.

137. Некрасов А. С. Анализ и прогнозы развития отраслей топливно-энергетического комплекса. – М.: ООО «Лето Индастриз», 2013. 592 с.

138. Некрасов А. С. Научно-методическое обеспечение инновационного развития энергетических систем. М.: Креативная экономика, 2011. 184 с.

139. Огнев А. Ю. Сотрудничество России и Китая в области электроэнергетики // Регионалистика. 2015. №3. С. 51-58.

140. Очерки по экономической синергетике / под ред. В. И. Маевского, С. Г. Кирдиной-Чэндлер, М. А. Дерябиной. – М.: ИЭ РАН, 2017. 182 с.

141. Окорочков Р. В. Финансовая безопасность электроэнергетических компаний: теория и методология управления / Р. В. Окорочков, Ю. А. Соколов, В. Р. Окорочков. – СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2007. 360 с.

142. Островский Г. М., Волин Ю. М. Технические системы в условиях неопределенности. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 319 с.

143. Павлов А. В., Павлов В. Н. Нечетко-случайные методы исследования неопределенности и их макроэкономические приложения. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2012. 188 с.

144. Погодина Т. В. Финансово-экономические механизмы создания инновационных территориальных кластеров / Т. В. Погодина, Н. В. Кузнецов, Н. М. Абикеев // Вестник финансового университета. 2016. №5. С. 26-36.

145. Полякова М. Р. Лицом на восток: потенциал экспорта электроэнергии из России в Китай // Вопросы безопасности. 2016. № 1. С. 27-38.

146. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. А. А. Макарова, Л. М. Григорьева, Т. А. Митровой; ИНЭИ РАН – АЦ при Правительстве РФ. – М.: ИНЭИ РАН, 2016. 196 с.

147. Порфирьев Б. Н. Экономическое измерение климатического вызова устойчивого развития России // Вестник Российской академии наук. 2019. №4. С. 400-407.

148. Порфирьев Б. Н. Новые глобальные тенденции развития энергетики – вызовы и риски интеграции России в мировую экономику // Проблемы прогнозирования. 2015. №1. С. 45-52.

149. Порфирьев Б. Н., Рогинко С. А. Альтернативная энергетика и социально ориентированная экономика // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2016. №3. С. 4-19.

150. Пу Т. Нелинейная экономическая динамика. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамик», 2000. 198 с.

151. Пяткова Н. И., Береснева Н. М. Моделирование критических инфраструктур энергетики с учетом требований энергетической

безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №3. С. 54-65.

152. Пятков Б. В., Массель А. Г. Анализ угроз энергетической безопасности на основе семантических и линейных оптимизационных моделей развития топливно-энергетического комплекса // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем (АМУР-2022). Сборник научных трудов XVI Международной школы-симпозиума АМУР-2022. Симферополь. 2022. С. 313-314.

153. Пяткова Н. И. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н. И. Пяткова, В. И. Рабчук, С. М. Сендеров, Н. И. Воропай. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 198 с.

154. Рабчук В. И. Проблемы обеспечения энергетических потребностей России до 2030 года при реализации стратегических угроз энергетической безопасности / В. И. Рабчук, С. М. Сендеров, С. В. Воробьев // Энергетическая политика. 2017. №1. С. 84-94.

155. Распределенная энергетика в России: потенциал развития / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов и др. – М.: Сколково, 2018. С. 89.

156. Салтанов А. Г. Подходы к оценке эффективности системы управления рисками энергокомпаний // Проблемы анализа риска. 2011. №3. С. 16-27.

157. Санеев Б. Г. Влияние реализации восточного вектора энергетической стратегии России на энергоэффективность хозяйственного комплекса региона / Б. Г. Санеев, А. Д. Соколов, С. Ю. Музычук, Р. И. Музычук // Регион: Экономика и Социология. 2020. № 1. С. 3-27.

158. Санеев Б. Г. Газохимические комплексы на востоке России: предпосылки создания / Б. Г. Санеев, Л. А. Платонов, Е. П. Майсюк, А. К. Ижбулдин // Энергетическая политика. 2008. №4. С. 68-76.

159. Семикашев В. В. Система моделей для анализа и прогнозирования развития мировой и российской экономики и энергетики / В. В. Семикашев, А. Ю. Колпаков и др. // Нефтяное хозяйство. 2015. №11. С. 6-11.

160. Семикашев В. В. Экономическая политика для отраслей ТЭК России в условиях санкций // Энергетическая политика. 2022. 8. С. 28-41.

161. Сендеров С. М., Смирнова Е. М. Индикативный анализ тенденций обеспечения энергетической безопасности сибирского и южного федеральных округов России // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2022. № 3. С. 12-28.

162. Сендеров С. М., Рабчук В. И. Энергетическая безопасность сегодня и основные методики ее обеспечения // Энергетическая политика. 2022. № 11. С. 56-69.

163. Сендеров С. М. Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных ситуаций на таких объектах / С. М. Сендеров, В. И. Рабчук, А. В. Еделев // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. №1. С. 70-78.

164. Сендеров С. М., Рабчук В. И. Состояние энергетической безопасности России на федеральном уровне: методический подход к оценке и основные результаты // Известия Российской академии наук. Энергия. 2018. №2. С. 3-18.

165. Сендеров С. М., Смирнова Е. М. Методы оценка и анализа уровня энергетической безопасности // Академия энергетики. 2009. №6. С. 30-40.

166. Сендеров С. М., Смирнова Е. М. Энергетическая безопасность регионов России: состояние и тенденции изменения за последние шесть лет // Энергетическая политика. 2018. №1. С. 16-23.

167. Сенчагов В. К. Экономическая безопасность России. – М.: Дело, 2009. 654 с.

168. Синяк Ю. В. Новые явления в мировой энергетике и их последствия для России // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2016. №4. С. 242-246.

169. Синяк Ю. В. Влияние климатических рисков на темпы и структуру развития российского топливно-энергетического комплекса в первой половине

XXI века // Прогнозирование экономического роста: материалы международной научной конференции. 2017. С. 193-207.

170. Сияк Ю. В. Топливо-энергетический комплекс России: возможности и перспективы / Ю. В. Сияк, А. С. Некрасов, С. А. Воронина, В. В. Семикашев, А. Ю. Колпаков // Проблемы прогнозирования. 2013. № 1(136). С. 4-21.

171. Сияк Ю. В. Инновационный фактор в перспективном развитии ТЭК России / Ю. В. Сияк, А. С. Некрасов, С. А. Воронина, В. В. Семикашев // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2011. № 9. С. 8-43.

172. Системные исследования в энергетике: методология и результаты / под ред. А. А. Макарова, Н. И. Воропая. – М.: ИНЭИ РАН, 2018. 309 с.

173. Смил В. Энергетика: мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики. – М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2012. 272 с.

174. Смирнов В. А. Проблемы повышения гибкости в энергетике. – М.: Наука, 1989. 192 с.

175. Смирнов В. А. Процессы адаптации в развитии энергетике. – М.: Наука, 1983. 196 с.

176. Смирнов К. С. Комплексная оценка проектов экспорта российской электроэнергии из восточной Сибири в Китай // Вестник ИрГТУ. 2017. №10. С. 131-137.

177. Соколова Е. Ковыкта – стимул развития // Иркутская Губерния. 2004. №5. С. 22-25.

178. Суслов К. В. Техничко-экономические аспекты применения возобновляемых источников энергии / К. В. Суслов, В. Ю. Конюхов, Т. И. Зимина, Н. А. Шамарова. – Иркутск: Иркутский государственный технический университет, 2014. 219 с.

179. Суслов Н. И. Анализ взаимодействий экономики и энергетики в период рыночных преобразований. – Новосибирск: ИЭиОПП СО РАН, 2002. 270 с.

180. Суслов Н. И. Энергетика России в ближайшие 20 лет: взгляд экономиста // ЭКО. 2013. № 8(470). С. 79-96.

181. Суслов Н. И., Бузулуцков В. Ф. Моделирование и анализ межотраслевых и межрегиональных взаимосвязей развития энергетического сектора России // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. № 2. С. 18-27.

182. Суслов Н. И. Возобновляемые источники энергии в стране, где много традиционных энергоресурсов // ЭКО. 2014. № 3(477). С. 69-88.

183. Тарасов А. Э. Сравнительный анализ вариантов поставки синтетического жидкого топлива и газа Ковыктинского газоконденсатного месторождения на экспорт // Энергетическая политика. 2008. №4. С.62-67.

184. Телегин Е. А. Энергетические рынки и энергетическая безопасность первой четверти XXI века: новые вызовы // Энергетическая политика. 2011. №6. С. 9-14.

185. Терентьев Н. Е. «Зеленая» энергетика в системе технологий новой промышленной революции // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2016. №14. С. 226-240.

186. ТЭК и экономика России: вчера, сегодня, завтра (1990-2010-2030) / под ред. Ю. К. Шафраника – М.: Издательский центр «ЭНЕРГИЯ», 2011. 488 с.

187. Управление развитием крупномасштабных систем / под ред. А. Д. Цвиркуна. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2012. 496 с.

188. Уразгалиев В. Ш. Вызовы, риски и возможности российской экономики в условиях энергоперехода // Современные технологии управления. 2022. № 4(100). 10004.

189. Уразгалиев В. Ш., Титков М. В. Газовая составляющая энергетической безопасности России // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Экономика. 2018. №2. С 176-216.

190. Филимонова И. В. Комплексный экономический анализ компаний нефтегазовой отрасли России / И. В. Филимонова, Л. В. Эдер, В. Ю. Немов, М. В. Мишенин // Экономический анализ: теория и практика. 2019. Т. 18. № 5(488). С. 925-943.



191. Фортов В. Е. Глобальная энергетическая безопасность / В. Е. Фортов, А. А. Макаров, Т. А. Митрова // Вестник Российской академии наук. 2007. Т. 77, №2. С. 99-107.
192. Цифровой переход в электроэнергетике России / под ред. В. Н. Княгинина, Д. В. Холкина. – М.: Центр стратегических разработок, 2007. С. 47.
193. Черников А. П., Орсова М. В. Энергетическая безопасность как фактор устойчивого развития региона. – Иркутск: Байкальский государственный университет экономики и права, 2008. 173.
194. Шевчук Л. М. Риск-анализ в задачах стратегического планирования для крупных энергетических компаний / Л. М. Шевчук, А. С. Лукьянов, А. А. Кудрявцев // Известия академии наук. Энергетика. 2000. №2. С. 52-64.
195. Щелоков Я. М. Энергетический анализ хозяйственной деятельности: энергетические проблемы энергетического производства. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. 390 с.
196. Эдер Л. В., Конторович А. Э. Необходимость смены парадигмы развития нефтегазового комплекса России // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. №1. С. 16-23.
197. Эдер Л. В., Филимонова И. В. Экономика нефтегазового сектора России // Вопросы экономики. 2012. № 10. С. 76-91.
198. Энергетическая безопасность России / В. В. Бушуев, Н. И. Воропай, А. М. Мастепанов, Ю. К. Шафраник и др. – Новосибирск: Наука, 1998. 302 с.
199. Энергетическая безопасность. Термины и определения / отв. ред. Н. И. Воропай. – М.: ИАЦ "Энергия", 2005. 60 с.
200. Энергетика и геополитика / В. В. Костюк, А. А. Макаров, Т. А. Митрова и др. – М.: Издательство «Наука», 2011. 397 с.
201. Юсифбейли Н. А., Насибов В. Х. Модели исследования электроэнергетической безопасности Азербайджана // Энергетическая политика. 2013. №3. С. 50-58.

202. Alam M. S. A model for the quality of life as a function of electrical energy consumption / M. S. Alam, B. K. Bala, A. M. Z. Huq, M. A. Matin // *Energy*. 1991. Vol. 16, iss. 4. pp. 739-745. doi: 10.1016/0360-5442(91)90023-F

203. Ang B. W., Choong W. L., Ng T. S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 42. pp. 1077-1093. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.064

204. Anton S. G., Nucu A. E. F. The effect of financial development on renewable energy consumption. A panel data approach // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. pp. 330-338. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.005.

205. *A Quest for Energy Security in the 21st Century: Resources and Constraints* / Asia Pacific Energy Research Centre. – Tokyo: Institute of Energy Economics, 2007. 100 p.

206. Arakawa F., Mori S., Torigoe T. Energy Security Model // *IFAC Proceedings*. 1989. Vol. 22(17). pp. 87-92.

207. Augutis J., Krikstolaitis R., Martisauskas L., Peciulyte S. Energy security level assessment technology // *Applied Energy*. 2012. Vol. 97. pp. 143-149. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.032

208. Baldwin D. A. The concept of security // *Review of International Studies*. 1997. Vol. 23. pp. 5-26.

209. Bamberg J. *British Petroleum and global oil 1950-1975*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 637 p.

210. Bashmakov I. A., Makarov A. A. An energy development strategy for the USSR. Minimizing greenhouse gas emissions // *Energy policy*. 1991. Vol. 19, №10. pp. 987-994.

211. Becker P. The Role of Synthetic Fuel in World War II Germany: Implication for today // *Air University Review*. 1981. Vol. 32, iss. 5. pp. 45-53.

212. Below A. Obstacles in energy security: an analysis of congressional and presidential framing in the United States // *Energy Policy*. 2013. Vol. 62. pp. 860-868. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.013

213. Berglund T., Modén L. Optimization of the power production system taking into consideration security in supply, load and different types of production // *Electrical Load-Curve Coverage*. 1977. pp. 65-76. doi: 10.1016/B978-0-08-022422-0.50010-6

214. Bielecki J. Energy security: is the wolf at the door? // *The Quarterly Review of Economics and Finance*. 2002. Vol. 42. pp. 235-250.

215. Binder C. R., Mühlemeier S., Wyss R. Indicator-based approach for analyzing the resilience of transitions for energy regions. Part I: Theoretical and conceptual considerations // *Energies*. 2017. Vol. 10, iss. 36. doi: 10.3390/en10010036

216. Blyth W., Lefevre N. Energy security and climate change policy interactions. – Paris: International Energy Agency, 2004. 88 p.

217. Blum H., Legey L. F. L. The challenging economics of energy security: ensuring energy benefits in support to sustainable development // *Energy Economics*. 2012. Vol. 34, iss. 6. pp. 1982-1989. doi: 10.1016/j.eneco.2012.08.013

218. Bohi D. R., Toman M. A. *The Economics of Energy Security*. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996. 152 p.

219. Brand U., Gleich A. Transformation toward a secure and precaution-oriented energy system with the guiding concept of resilience—implementation of low-exergy solutions in Northwestern Germany // *Energies*. 2015. Vol.8. pp. 6995-7019. doi: 10.3390/en8076995

220. Cherp A., Jewell J. The concept of energy security: Beyond the four As // *Energy Policy*. 2014. Vol. 75. pp. 415-421. doi: 10.1016/j.enpol.2014.09.005

221. Cherp A. Defining energy security takes more than asking around // *Energy Policy*. 2012. Vol. 48. pp. 841-842. doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.016

222. Chester L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature // *Energy policy*. 2010. Vol. 38, iss. 2. pp. 887-895. doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.039

223. Coaffee J. Risk, resilience, and environmentally sustainable cities // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, iss. 12. pp. 4633-4638. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.048

224. Cohen G., Joutz F., Loungani P. Measuring energy security: trends in the diversification of oil and natural gas supplies // *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. pp. 4860-4869.
225. Colglazier E. W., Deese D. A. Energy and security in the 1980s // *Annual Review of Energy*. 1983. Vol. 8(1). pp. 415-449.
226. Costanza R. Quality of Life: An Approach Integrating Opportunities, Human Needs, and Subjective Well-Being // *Ecological Economics*. 2007. Vol. 61. pp. 267-276. doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.02.023
227. Cox E. Assessing long-term energy security: The case of electricity in the United Kingdom // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. pp. 2287-2299. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.084
228. Cuadra L., Salcedo-Sanz S., Ser J. D., Jiménez-Fernández S., Geem Z. W. A critical review of robustness in power grids using complex networks concepts // *Energies*. 2015. Vol. 8. pp. 9211-9265, 2015. doi: 10.3390/en8099211
229. Deese D. A. Energy: economics, politics, and security // *International Security*. 1979. Vol. 4, iss. 3. pp. 140-153.
230. Drexel K. The US Department of Defense: Valuing Energy Security // *Journal of Energy Security*, June 2009.
231. Dresner S. *The principles of sustainability*. – London: Earthscan, 2008. 205 p.
232. Dunn L., Dunn R. *W&J Energy Index*. – Washington: Jefferson College, 2012. 44 p.
233. *Effective Carbon Rates: Pricing CO2 through Taxes and Emissions Trading Systems*. – Paris: OECD Publishing, 2016. 172 p.
234. *Energy security in the era of climate change: The Asia-Pacific experience* / edited by L. Anceschi, J. Symons. – New York: Palgrave macmillan, 2012. 299 p.
235. *Energy technology perspectives 2010. Scenarios and strategies to 2050*. OECD. – Paris: International Energy Agency (IEA), 2010. 706 p.
236. *Energy supply security: the emergency response of IEA countries*. – Paris: International Energy Agency, 2015. 606 p.

237. Fabra N., Motta M, Peitz M. Learning from electricity markets: How to design a resilience strategy // Energy policy. 2022. №168. 113116. doi: 10.1016/j.enpol.2022.113116

238. Farfan J., Breyer Ch. Aging of European power plant infrastructure as an opportunity to evolve towards sustainability // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, iss. 28. pp. 18081-18091. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.138

239. Filipovic S., Radovanovic M., Golusinc V. Macroeconomic and political aspects of energy security – Exploratory data analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 97. pp. 428-435. doi: 10.1016/j.rser.2018.08.058

240. Finke J., Bertsch V. Implementing a highly adaptable method for the multi-objective optimization of energy systems // Applied Energy. 2023 Vol. 332, 120521. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120521

241. Gasper D. Understanding the diversity of conceptions of well-being and quality of life // The Journal of Socio-Economics. 2010. Vol. 39, iss. 3. pp. 351-360. doi: 10.1016/j.socec.2009.11.006

242. Georgiou G. C. US energy security and policy options for the 1990s // Energy Policy. 1993. Vol. 21, iss. 8. pp. 831-839. doi: 10.1016/0301-4215(93)90168-F

243. Gibson R. B., Holtz S., Tansey J., Whitelaw G. Sustainability assessment: criteria and processes. – London: Taylor & Francis, 2005. 278 p.

244. Global Energy Architecture Performance Index. Report 2017. World Energy Forum, 2017. 32 p.

245. Gökgöz F., Güvercin M. T. Energy security and renewable energy efficiency in EU // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 96. pp. 226-239. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.046

246. Goldthau A., Witte J. M. Global energy governance: the new rules of the game. – Berlin: Global public policy institute, 2010. 372 p.

247. Golpira H., Bahramara S. Internet-of-things-based optimal smart city energy management considering shiftable loads and energy storage // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 264. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121620

248. Gupta E. Oil Vulnerability Index of oil-importing countries // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, iss. 3. pp. 1195-1211. doi: 10.1016/j.enpol.2007.11.011
249. Haas R., Nakicenovic N., Ajanovic A. Towards of sustainability of energy systems: A primer of how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies // *Energy Policy*. 2008. Vol.36, iss. 11. pp. 4012-4021. doi: 10.1016/j.enpol.2008.06.028
250. Haines Y. Y. On the definition of resilience in systems // *Risk Analysis*. 2009. Vol. 29(4). pp. 498-501. doi: 10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x
251. Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide. – Paris: OESD, 2008. 152 p.
252. He P., Ng T. S., Su B. Energy-economic recovery resilience with Input-Output linear programming models // *Energy Economics*. 2017. Vol. 68. pp. 177-191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.007>
253. Henry D., Ramirez-Marquez H. E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time // *Reliability engineering & system safety*. 2012. Vol. 99. pp. 114-122. doi: 10.1016/j.ress.2011.09.002
254. Hernández D. Understanding “energy insecurity” and why it matters to health // *Social Science & Medicine*. 2016. Vol. 167. pp. 1-10. doi: 10.1016/j.socscimed.2016.08.029
255. Hippel von D., Savage T., Hayes P. Introduction to the Asian energy security project: project organization and methodologies // *Energy policy*. 2011. №39. pp. 6712-6718.
256. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. Vol. 4. pp. 1-23.
257. Holling C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems // *Ecosystems*. 2001. Vol. 4, iss. 5. – pp. 390-405.
258. Howell S., Rezgui Y., Hippolyte J, Jayan B., Li H. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 77. pp. 193-214. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.280

259. Hughes L. A generic framework for the description and analysis of energy security in an energy system // *Energy Policy*. 2012. vol. 42. pp. 221-231. doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.079
260. Hughes L. The four 'R's of energy security // *Energy policy*. 2009. vol. 37, iss. 6. pp. 2459-2461. doi: 10.1016/j.enpol.2009.02.038
261. Hughes L. The effects of event occurrence and duration on resilience and adaptation in energy systems // *Energy*. 2015. Vol. 84. pp. 443-454. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.010
262. Ibanez E., Lavrenz S., Gkritza K., Mejia-Giraldo D. A., Krishnan V., McCalley J. D., Somani A. K. Resilience and robustness in long-term planning of the national energy and transportation system // *International Journal of Critical Infrastructures*. 2016. Vol. 12. pp. 82-103. doi: 10.1504/IJCIS.2016.075869
263. Ikerd J. *The essentials of economic sustainability*. – Sterling: Stylus publishing, 2012. 150 p.
264. *International Index of Energy Security Risk: Assessing Risk in a Global Energy Market* / Global Energy institute U.S. Chamber of Commerce, 2018. 80 p.
265. Isiklar G., Lahiri K. How far ahead can we forecast? Evidence from cross-country surveys // *International journal of forecasting*. 2007. № 23. pp. 167-187.
266. Jackson J. Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools // *Energy policy*. 2010. № 38. pp. 3865-3873.
267. Jansen J.C., Seebregts A. Long-term energy services security: What is it and how can it be measured and valued? // *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. pp. 1654-1664. doi: 10.1016/j.enpol.2009.02.047
268. Jeong H., Kim Y., Lee Y., Ha K., Won B., Lee D., Hahn D. A «must-go path» scenario for sustainable development and the role of nuclear energy in the 21st century // *Energy policy*. 2010. Vol. 38, iss. 4. pp. 1962-1968. doi: 10.1016/j.enpol.2009.11.077
269. Jevons W. S. *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. – London: Macmillan, 1866. 411 p.

270. Jewell J. The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES). Primary Energy Sources and Secondary Fuels. – Paris: International Energy Agency, 2011. 43 p.

271. Kester J. The politics of energy: critical security studies, new materialism and governmentality. – New York: Routledge, 2018. 248 p.

272. Khatuaa P. K., Ramachandaramurthy V. K., Kasinathan P., Yonga J. Y., Pasupuleti J., Rajagopalan A. Application and assessment of internet of things toward the sustainability of energy systems: Challenges and issues // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 53. doi: 10.1016/j.scs.2019.101957

273. Kirshen D. S., Strbac G. Fundamentals of power system economics. – London: John Wiley and Sons, Ltd, 2004. 284 p.

274. Kisel E., Hamburg A., Härm M., Leppiman A., Ots M. Concept for energy security matrix // Energy policy. 2016. Vol. 95. pp. 1-9. doi: 10.1016/j.enpol.2016.04.034

275. Klein R., Nicholls R., Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? // Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards. 2003. Vol. 5. pp. 35-45. doi: 10.1016/j.hazards.2004.02.001

276. Knuth S. «Breakthroughs» for a green economy? Financialization and clean energy transition // Energy Research & Social Science. 2018. Vol. 41. pp. 220-229. doi: 10.1016/j.erss.2018.04.024

277. Kruyt B., Van Vuuren D. P., De Vries H. J. M., Groenenber H. Indicators for energy security // Energy policy. 2009. vol. 37, iss. 6. pp. 2166-2181.

278. Kwasinski A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level // Energies. 2016. Vol. 9, iss. 93. doi: 10.3390/en9020093

279. Kirshen D. S., Strbac G. Fundamentals of power system economics. – London: John Wiley and Sons, 2004. 284 p.

280. Kononov Y. D. The Effect of Length of Forecast Horizon on Rational Aggregation in Long-Term Forecasting of Energy Systems Development / Y. D.



Kononov, D. Y. Kononov, S. V. Steklova // *Energy Systems Research*. 2018. Vol. 1, iss. 1. pp. 51-56.

281. Lafferty W. M., Meadowcroft J. *Implementing sustainable development: strategies and initiatives in high consumption societies*. – London: Oxford University Press, 2000. 544 p.

282. Lambert J. G., Hall C. A. S., Balogh S. B., Gupta A., Arnold M. *Energy, EROI and quality of life* // *Energy Policy*. 2014. Vol. 64. pp. 153-167. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.001

283. Le C. C., Paltseva E. *Measuring the security of external energy supply in the European Union* // *Energy Policy*. 2009. Vol. 37, iss. 11. pp. 4474-4481. doi: 10.1016/j.enpol.2009.05.069

284. Le T., Nguyen C. P. *Is energy security a driver for economic growth? Evidence from a global sample* // *Energy Policy*. 2019. Vol. 129. pp. 436-451. doi: 10.1016/j.enpol.2019.02.038

285. Lei Y., Liang Z., Ruan P. *Evaluation on the impact of digital transformation on the economic resilience of the energy industry in the context of artificial intelligence* // *Energy Reports*. 2023. № 9(2023). pp. 785-792.

286. Lin Y., Bie Z. *Study on the resilience of the integrated energy system* // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 103. pp. 171-176. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.268

287. Liu B., Matsushima J. *Annual changes in energy quality and quality of life: A cross-national study of 29 OECD and 37 non-OECD countries* // *Energy Reports*. 2019. Vol. 5. pp. 1354-1364. doi: 10.1016/j.egypro.2019.09.040

288. Liu L., Chena T., Lina Y. *Energy consumption and quality of life: Energy efficiency index* // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 88. pp. 224-229. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.152

289. Loktionov V. I., *Business barriers to the Russian sustainable energy transition* // *Geopolitics of Energy*. 2018. Vol. 40, iss. 10. pp. 2-6.

290. Loktionov V. I. *Energy consumption, GHG emissions and quality of life: The case of Russia's institutional transition to sustainability* // *Geopolitics of Energy*. 2020. Vol. 42, iss. 3. pp. 2-5.

291. Loktionov V. I. Energy resilience assessment in the period of transition to sustainable energy // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE. 2018. pp. 1-7. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602622
292. Loktionov V. I. Nuclear Power and the Russian energy security strategy // Geopolitics of Energy. 2017. Vol. 39, iss. 2. pp. 2-8.
293. Loktionov V. I. Russian policy on the European energy security // Geopolitics of Energy. 2016. Vol. 38, iss. 5 and 6. pp. 2-11.
294. Loktionov V. I. The Russian Energy Policy: On the Way to Sustainability // Geopolitics of Energy. 2017. Vol. 39, iss. 8. pp. 8-12.
295. Loktionov V. I., Loktionova E. A. Development of the Russian energy system resilience: Towards a more secure future // Geopolitics of Energy. 2019. Vol. 41, iss. 4. pp. 9-12.
296. Löschel A., Moslener U., Rübhelke D. T. G. Indicators of energy security in industrial countries // Energy policy. 2010. Vol. 38., iss. 4 pp. 1665-1671. doi: 10.1016/j.enpol.2009.03.061
297. Lubell H. Security of supply and energy policy in Western Europe // World Politics. 1961. Vol. 13(3). pp. 400-422. doi: 10.2307/2009482
298. MacGill I. F., Vithayasrichareon P. A Monte Carlo based decision-support tool for assessing generation portfolios in future carbon constrained electricity industries // Energy policy. 2012. №41. pp. 374-392.
299. Manne A. S., Roland K., Stephan G. Security of supply in the Western European market for natural gas // Energy Policy. 1986. Vol. 14(1). pp. 52-64. doi: 10.1016/0301-4215(86)90089-3
300. Martišauskasa L., Augutisa J., Krikštolaitisa R. Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions // Energy Strategy Reviews. 2018. Vol. 22. pp. 106-118. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.007
301. Maryonoa Wijayaa H. B., Widjonarkoa P. Energy resilience assessment by using SEM approach in the Central Java Province, Indonesia // Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2016. Vol. 227. pp. 146-151. doi: 10.1016/j.sbspro.2016.06.055

302. Matzenberger J., Hargreaves N., Raha D., Dias P. A novel approach to assess resilience of energy systems. *International journal of disaster resilience in the built environment*. 2015. Vol. 6, iss 2. pp. 168-181. doi: 10.1108/IJDRBE-11-2013-0044

303. Mayer A., Smith E. K. Exploring the link between energy security and subjective well-being: a study of 22 nations // *Energy, Sustainability and Society*. 2019. Vol. 9. doi: 10.1186/s13705-019-0216-1

304. Mazur A. Does increasing energy or electricity consumption improve quality of life in industrial nations? // *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. pp. 2568-2572. doi: 10.1016/j.enpol.2011.02.024

305. Mimica M, Urtasun L., Krajačić J. A robust risk assessment method for energy planning scenarios on smart islands under the demand uncertainty // *Energy*. 2022. Vol. 240. 122769.

306. Mohn K., Misund B. Investment and uncertainty in the international oil and gas industry // *Energy economics*. 2009. №31. pp. 240-248.

307. Molyneaux L., Brownb C., Wagner L., Foster J. Measuring resilience in energy systems: Insights from a range of disciplines // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. pp. 1068-1079, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.063>

308. Molyneaux L. Resilience and electricity systems: A comparative analysis / L. Molyneaux, L. Wagner, C. Froome, J. Foster // *Energy policy*. 2012. №47. pp. 188-201. doi: 10.1016/j.enpol.2012.04.057

309. Morgan Stanley Institute for Sustainable Investing. Sustainable Signals: New data from individual investors. 2018. URL: [https://www.morganstanley.com/pub/content/dam/msdotcom/ideas/sustainable-signals/pdf/Sustainable\\_Signals\\_Whitepaper.pdf](https://www.morganstanley.com/pub/content/dam/msdotcom/ideas/sustainable-signals/pdf/Sustainable_Signals_Whitepaper.pdf) (дата обращения: 2019.10.09)

310. Motlagh N. H., Mohammadrezaei M., Hunt J., Zakeri B. Internet of Things (IoT) and the Energy Sector / N. H. Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, B. Zakeri // *Energies*. 2020. Vol. 13, iss. 494. doi:10.3390/en13020494

311. Nadimi R., Tokimatsu K. Energy use analysis in the presence of quality of life, poverty, health, and carbon dioxide emissions // *Energy*. 2018. Vol. 153. pp. 671-684. doi: 10.1016/j.energy.2018.03.150

312. Nadimi R., Tokimatsu K. Modeling of quality of life in terms of energy and electricity consumption // *Applied Energy*. 2018. Vol. 212. pp. 1282-1294. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.006

313. Neil Adger W. Vulnerability // *Global Environmental Change*. 2006. Vol. 16. pp. 268-281. doi: :10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

314. O'Brien G., Hope, A. Localism and energy: negotiating approaches to embedding resilience in energy systems // *Energy Policy*. 2010. Vol. 38, iss. 12. pp. 7550-7558. doi: 10.1016/j.enpol.2010.03.033

315. O'Brien G. Vulnerability and resilience in the European energy system // *Energy&Environment*. 2009. Vol. 20, iss. 3. pp. 399-410. doi: 10.1260/095830509788066457

316. Oil and governance: State-owned enterprises and the world energy supply / edited by D. G. Victor, D. R. Hults, M. Thurber. – New York: Cambridge University Press, 2012. 1014 p.

317. Pasten C., Santamarina J. C. Energy and quality of life // *Energy Policy*. 2012. Vol. 49. pp. 468-476. doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.051

318. Perrings C. Resilience in the dynamics of economy-environment systems // *Environmental and Resource Economics*. 1998. Vol. 11(3-4). pp. 503-520.

319. Projected costs of generating electricity. 2015 Edition. – Paris: International Energy Agency, Nuclear Energy Agency, 2015. 215 p. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>

320. Riahi K., Jewell J., Cherp A. Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices // *Energy policy*. 2014. Vol. 65. pp. 743-760. doi: 10.1016/j.enpol.2013.10.051

321. Reliability – guidelines to understanding reliability prediction. European Power Supply Manufacturers Association, 2005. 29 p. URL: [http://www.epsma.org/MTBF%20Report\\_24%20June%202005.pdf](http://www.epsma.org/MTBF%20Report_24%20June%202005.pdf)

322. Rochas C., Kuznecova T., Romagnoli F. The concept of the system resilience within the infrastructure dimension: application to a Latvian case // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 88. pp. 358-368. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.081>

323. Roege P. E., Collier Z. A., Mancillas J., McDonagh J. A., Linkov I. Metrics for energy resilience // *Energy Policy*. 2014. Vol. 72. pp. 249-256. doi: 10.1016/j.enpol.2014.04.012

324. Sadeghi M., Shavvalpour S. Energy risk management and value at risk modeling // *Energy policy*. 2006. №34. pp. 3367-3373.

325. Sadorsky P. Modeling renewable energy company risk // *Energy policy*. 2012. №40. pp. 39-40.

326. Scheepers M. EU standards for energy security of supply / M. Scheepers, A. Seebregts, J. de Jong, H. Maters – The Netherlands: Energy research Centre of the Netherlands, Clingendael international energy programme, 2007. 71 p.

327. Simmiea J., Martin R. The economic resilience of regions: towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions // Economy and Society*. 2010. Vol. 3. pp. 27-43. doi: 10.1093/cjres/rsp029

328. Skea J., Chaudry M., Wang X. The role of gas infrastructure in promoting UK energy security // *Energy Policy*. 2012. Vol. 43. pp. 202-213. doi: 10.1016/j.enpol.2011.12.057

329. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. pp. 1654-1677, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.028>

330. Sioshansi F. P. Energy, sustainability and the environment: technology, incentives, behavior. – New York: Elsevier, 2011. 640 p.

331. Smil V. Energy transitions: history, requirements, prospects. – Westport: Praeger, 2010. 178 p.

332. Sovacool B. K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach // *Energy*. 2011. Vol. 36, iss. 8. pp. 5343-5355. doi: 10.1016/j.energy.2011.06.043

333. Sovacool B. K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions // *Energy Research & Social Science*. 2016. Vol. 13. pp. 202-215. doi: 10.1016/j.erss.2015.12.020

334. Sovacool B. K. The methodological challenges of creating a comprehensive energy security index // *Energy Policy*. 2012. Vol. 48. pp. 835-840. doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.017

335. Sovacool B. K. Linking Energy Independence to Energy Security // *I A E E Energy Forum*. 2013. Vol. 3. pp. 17-21.

336. Tabak J. *Coal and oil. – New York: Facts on File, 2009. 208 p.*

337. Taleb N. N. *The black swan: The impact of the highly improbable. – New York: Random House Trade Paperbacks, 2010. 444 p.*

338. Tertzakian P., Hollihan K. *The end of energy obesity. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 296 p.*

339. *The energy reader / edited by L. Nader. – London: WILEY-BLACKWELL, 2010. 548 p.*

340. *The New energy paradigm / edited by D. Helm. – New York: Oxford University Press, 2007. 518 p.*

341. *The routledge handbook of energy security / edited by B.K. Sovacool. – New York: Routledge, 2011. 446 p.*

342. Thomas S., Kerner D. *Defense energy resilience: Lessons from Ecology. – Carlisle: Army War College, Strategic Studies Institute, 2010. 44 p.*

343. Tierney K. Resilience and the Neoliberal Project: Discourses, Critiques, Practices and Katrina // *American Behavioral Scientist*. 2015. Vol. 59, iss. 10. pp. 1327-1342.

344. Tiwari Sh., Schelly Ch., Ou G., Sahraei-Ardakani M., Chen J., Jafarishiadeh F. Conceptualizing resilience: An energy services approach // *Energy Research & Social Science*. 2022. Vol. 94. 102878.

345. Tongsopit S., Kittner N., Chang Y., Aksornkij A., Wangjiraniran W. Energy security in ASEAN: a quantitative approach for sustainable energy policy // Energy policy. 2016. Vol. 90. pp. 60-72. doi: 10.1016/j.enpol.2015.11.019
346. Turton H., Barreto L. Long-term security of energy supply and climate change // Energy Policy. 2006. Vol. 34, iss. 15. pp. 2232-2250. doi: 10.1016/j.enpol.2005.03.016
347. Valuation of energy security for the United States. – Washington: Department of Energy, 2017. P. 288.
348. Vassilyev S. N. Intelligent control systems / S. N. Vassilyev, A. Yu. Kelina, Y. I. Kudinov, F. F. Pashchenko // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. pp. 623-628. doi: 10.1016/j.procs.2017.01.088
349. Vesnic-Alujevic L., Breitegger M., Pereira A. G. What smart grids tell about innovation narratives in the European Union: Hopes, imaginaries and policy // Energy Research & Social Science. 2016. Vol. 12. pp. 16-26, doi: 10.1016/j.erss.2015.11.011
350. Vugrin E. D. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems / E. D. Vugrin, D. E. Warren, A. E. Mark, R. C. Camphouse // Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems. 2010. pp. 77-116. doi: 10.1007/978-3-642-11405-2\_3
351. Walker B. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems / B. Walker, C. S. Holling, S. R. Carpenter, A. Kinzig // Ecology and Society. 2004. Vol. 9(5).
352. Watson J. Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity, oil, and gas sectors in the United States / J. Watson, R. Guttromson, C. Silva-Monroy, R. Jeffers, K. Jones, J. Ellison, C. Rath, J. Gearhart, D. Jones, T. Corbet, C. Hanley, L. T. Walker. – California: Sandia National Laboratories, 2014. 104 p.
353. World Commission on Environment and Development: Our Common Future. – London: Oxford University Press, 1987. 383 p.

354. Wiig S., Fahlbruch B. Exploring resilience: A scientific journey from practice to theory. Cham: Springer Open, 2019. 128 p.
355. Willis H. H., Loa K. Measuring the resilience of energy distribution systems. – Santa Monica: the RAND Corporation, 2015. 38 p.
356. Winzer Ch. Conceptualizing energy security // Energy policy. 2012. №46. pp. 36-48.
357. World energy trilemma index: Monitoring the sustainability of national energy systems. – London: The World Energy Council, 2018. – 158 p.
358. Wright P. Liberalisation and the security of gas supply in the UK // Energy policy. 2005. Vol. 33, iss. 17. pp. 2272-2290.
359. Xu Y., Du J., Wang Y. How to improve sustainability for industrial sectors: Optimizing production scales based on performance-oriented resource reallocation // Energy Economics. 2023. Vol. 119. 106525
360. Yergin D. The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. – New York: Simon & Schuster, 1991. 908 p.
361. Zhou W. A retrospective analysis with bibliometric of energy security in 2000-2017 / W. Zhou, A. Kou, J. Chen, B. Ding // Energy Reports. 2018. Vol. 4. pp. 724-732. doi: 10.1016/j.egy.2018.10.012
362. Zou C. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era / C. Zou, Q. Zhao, G. Zhang, B. Xiong // Natural Gas Industry B. 2016. Vol. 3, iss. 1. pp. 1-11. doi: 10.1016/j.ngib.2016.02.001
363. Zweifel P., Bonomo S. Energy security: Coping with multiple supply risks // Energy economics. 1995. Vol. 17, iss. 3. pp. 179-183. doi: 10.1016/0140-9883(95)00018-P



## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение 1. Динамика изменения положения России на мировом энергетическом рынке с 1991 г. по 2021 г.**

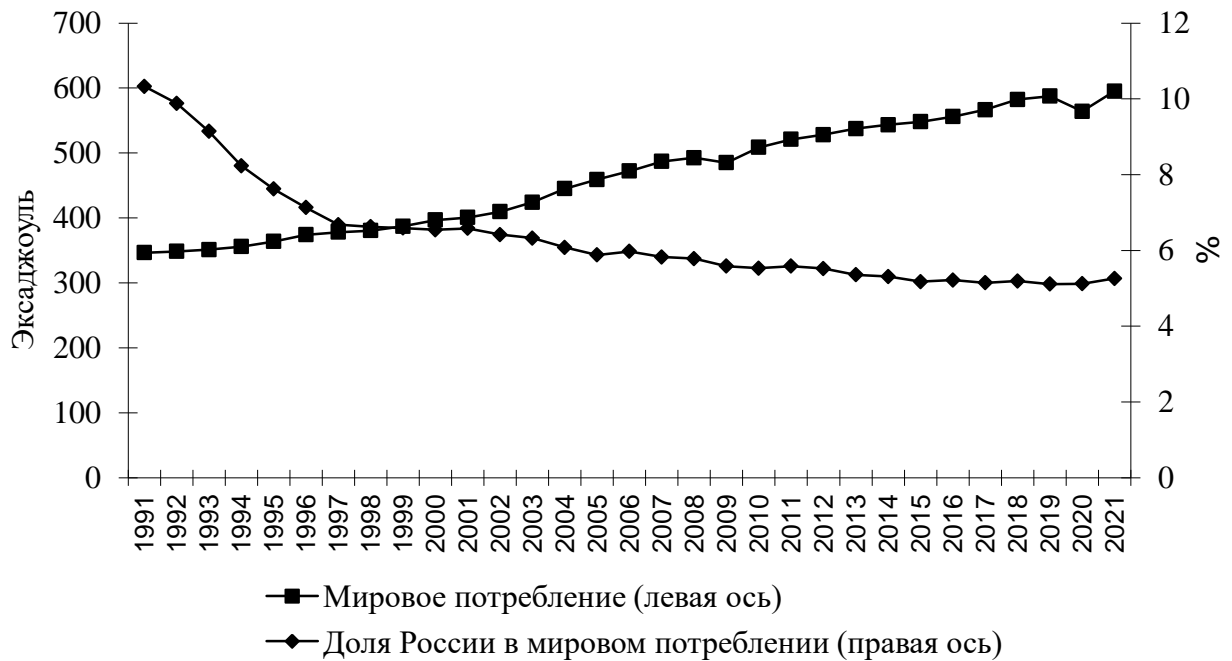


Рисунок 1 – Динамика мирового потребления первичных энергоресурсов

Источник: составлено автором на основе данных ВР

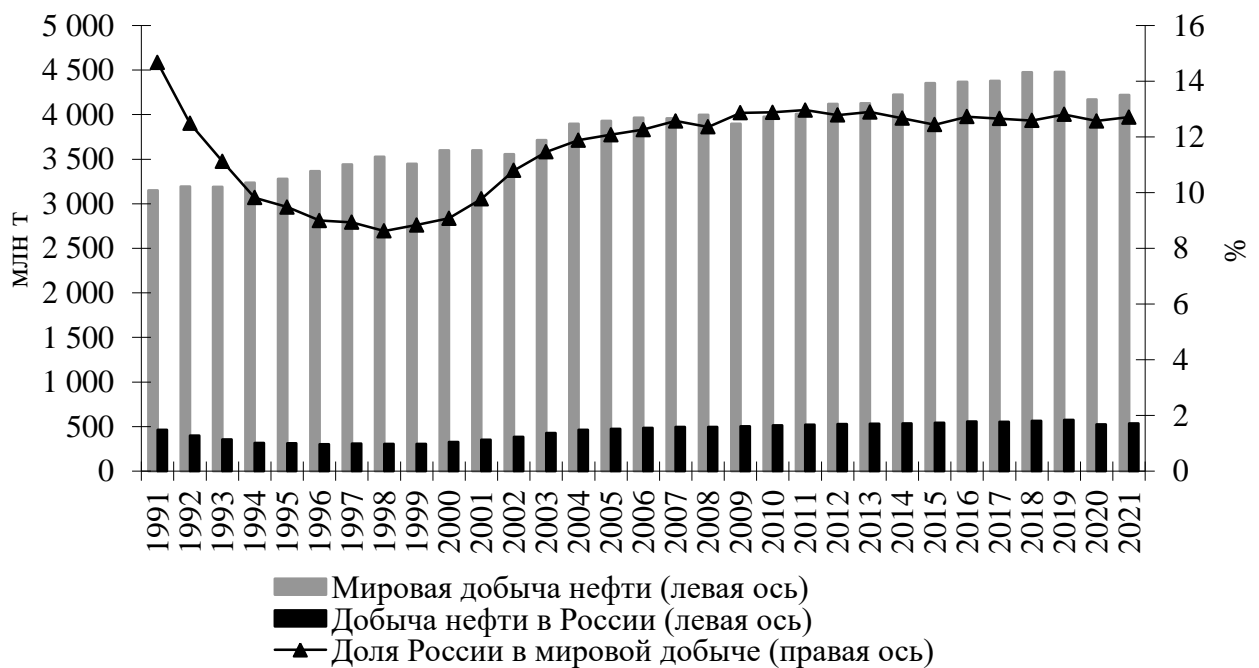


Рисунок 2 – Объемы добычи нефти в мире и в России

Источник: составлено автором на основе данных ВР

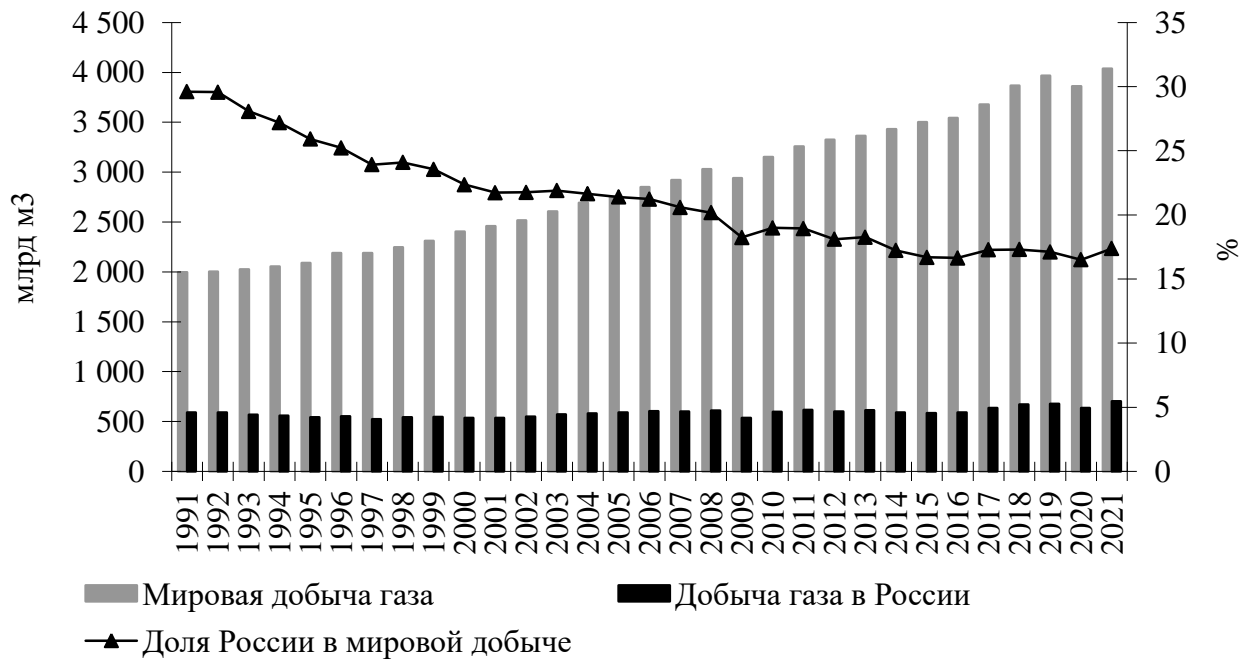


Рисунок 3 – Объемы добычи газа в мире и в России

Источник: составлено автором на основе данных ВР

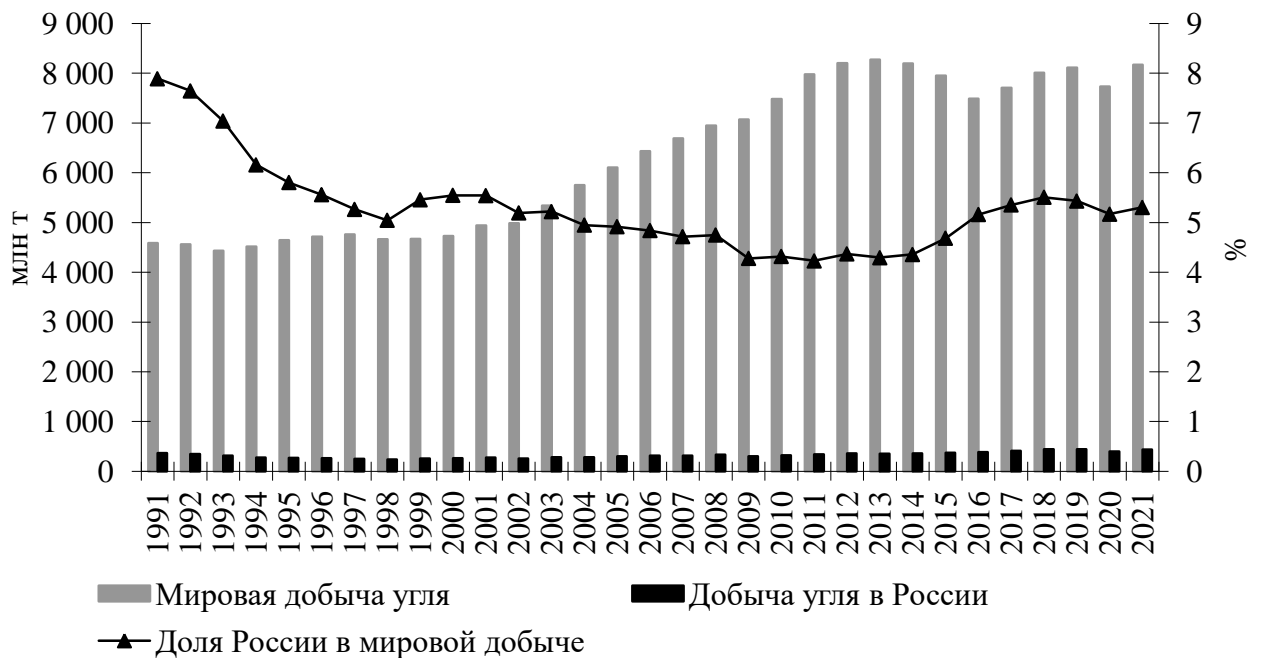


Рисунок 4 – Объемы добычи угля в мире и в России

Источник: составлено автором на основе данных ВР

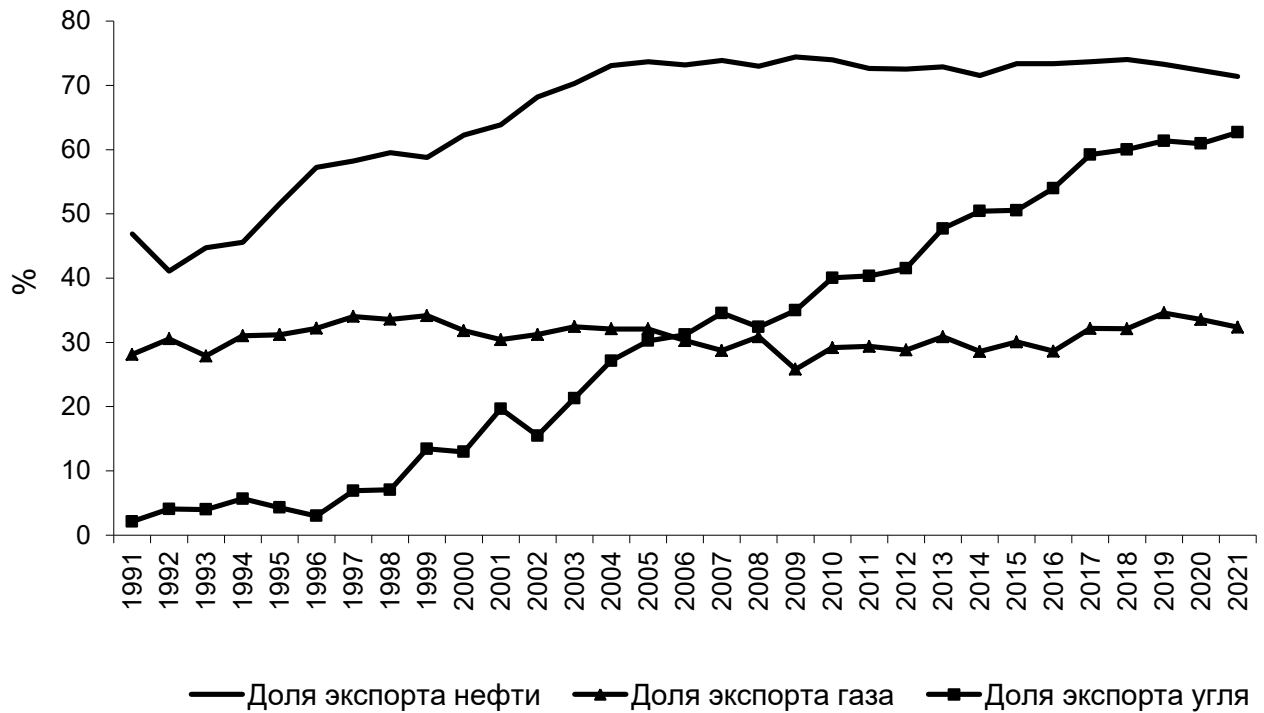


Рисунок 5 – Динамика доли экспорта в структуре производства углеводородов в России

Источник: составлено автором на основе данных ВР

**Приложение 2. Формальное описание разработанной  
д.э.н. Ю. Д. Кононовым модели МИДЛ, использованной при оценке  
макроэкономических последствий дефицита инвестиций  
в электроэнергетику**

Модель МИДЛ (Макроэкономическая Имитационная Динамическая с распределенными Лагами) предназначена для оценки влияния изменений в ТЭК страны на развитие экономики. ТЭК в МИДЛ представлен электроэнергетикой (отдельно производство электроэнергии и централизованного тепла), газовой отраслью (включая магистральные газопроводы), добычей угля и нефти, нефтепереработкой. Рассматриваемые отрасли экономики включают: машиностроение (с выделением инвестиционного и потребительского), черную и цветную металлургию, химическую промышленность, лесопромышленный комплекс, промышленность стройматериалов, легкую и пищевую промышленность, строительство, транспорт, связь, торговлю, услуги и прочие отрасли.

МИДЛ построена на принципах межотраслевого баланса. Она описывает производственные взаимосвязи между указанными отраслями, между производственной и непроизводственной сферами экономики по потреблению товаров и услуг, инвестиционные и экспортно-импортные связи.

В модели максимизируется конечное потребление товаров и услуг за рассматриваемый период с учетом задаваемых условий и ограничений

$$\max \sum \sum Y_i(t) \delta_i(t) \quad (1)$$

где  $Y_i(t)$  – конечное потребление продукции  $i$  на непроизводственные нужды в году  $t$ ;  $\delta_i(t)$  – дисконтирующий множитель.

Основными уравнениями модели являются выраженные в стоимостной форме балансы производства и потребления продукции рассматриваемых отраслей:

$$X_i(t) = \sum a_{ij}(t) X_j(t) + U_i(t) + Y_i(t) + \text{ЭК}_i(t) - \text{ИМ}_i(t) + \overline{\Delta Z}_i(t) \quad (2)$$

где  $X_i(t)$  – производство валовой продукции в отрасли  $i$ ;  $\mathcal{E}K_i(t)$  и  $ИМ_i(t)$  – экспорт и импорт  $i$ -й продукции;  $\overline{\Delta Z}_i(t)$  – изменение запасов или задаваемая дополнительная потребность в продукции  $i$ -й отрасли;  $a_{ij}(t)$  – меняющиеся во времени коэффициенты затрат продукции  $i$  на производство продукции  $j$ ;  $U_i(t)$  – затраты продукции фондообразующих отраслей на ввод новых производственных мощностей.

$$U_i(t) = \sum c_{ij}(\tau) \sum Z_j(\tau) \lambda_j(\tau - t) + \overline{U}_i(t) \quad (3)$$

где  $c_{ij}(\tau)$  – удельные материальные затраты на сооружение производственных мощностей, вводимых в году  $\tau$ ;  $Z_j(\tau)$  – новые или реконструируемые производственные мощности, вводимые в год  $\tau$ ;  $\lambda_j(\tau)$  – распределение инвестиционных ресурсов по годам строительства;  $\overline{U}_i(t)$  – задаваемые затраты продукции фондообразующих отраслей на жилищное строительство.

$$Z_i(t) = X_i(t + 1) - [1 - \beta_i(t)] X_i(t) \quad (4)$$

где  $\beta_i(t)$  – выбытие мощностей в отрасли  $i$  в году  $t$ .

С уравнением (3) связано уравнение ограничений на инвестиционные ресурсы в отдельных отраслях или в производственной сфере в целом:

$$K(t) = \sum U_i(t) \leq K(t - 1) \overline{I}_k(t) \quad (5)$$

где  $K(t)$  – сумма инвестиций в основной капитал;  $\overline{I}_k(t)$  – задаваемый индекс максимального роста инвестиций.

Учитывается также ограничение на трудовые ресурсы:

$$L(t) = \sum l_i(t) X_i(t) \leq \overline{L}(t) \quad (6)$$

где  $l_i(t)$  – трудоемкость продукции  $i$  в году  $t$ ;  $\overline{L}(t)$  – задаваемая (в целом по производственной сфере или по отдельным отраслям) максимально возможная численность работающих.

Ожидаемые изменения (тенденции) в структуре конечного потребления товаров и услуг учитываются путем задаваемых двухсторонних ограничений на рост потребления:

$$Y_i(t-1) \underline{IY}_i(t) \leq Y_i(t) \leq Y_i(t-1) \overline{IY}_i(t) \quad (7)$$

где  $\overline{IY}_i(t)$  и  $\underline{IY}_i(t)$  – минимальный и максимальный индексы роста потребления.

Такие же двухсторонние ограничения задаются на поведение траекторий  $X_i(t)$ . Эти ограничения, отражающие действующие и прогнозируемые тенденции, в какой-то мере сглаживают «переключательный» эффект, присущий линейным моделям.

На объемы производства продукции накладываются дополнительные ограничения, которые учитывают, что имеющиеся в году  $t$  производственные мощности не могут быть загружены на 100% из-за ремонта, модернизации и других факторов:

$$X_i(t) \leq (X_i(t-1) + Z_i(t)) \rho_i(t) \quad (8)$$

где  $\rho_i(t)$  – коэффициент загрузки производственных мощностей.

Экспорт товаров и услуг ограничивается в модели снизу, а импорт – сверху:

$$\mathcal{EK}_i(t) \geq \underline{\mathcal{EK}_i}(t) \quad (9)$$

$$\text{ИМ}_i(t) \leq \overline{\text{ИМ}_i}(t) \quad (10)$$

При этом может ставиться условие баланса экспорта и импорта. Например, импорт продукции отрасли  $i$  в году  $t$  не должен превосходить ее экспорт на величину  $\gamma_i(t)$ :

$$\text{ИМ}_i(t) \leq \gamma_i(t) \mathcal{EK}_i(t) \quad (11)$$

MELENTIEV ENERGY SYSTEMS INSTITUTE  
OF SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

On the rights of the manuscript

**Loktionov Vadim Ilich**

**METHODOLOGY FOR ENSURING ENERGY SECURITY BASED ON  
INCREASING THE ENERGY SYSTEMS ADAPTABILITY**

Scientific specialization 5.2.3. Regional and sectoral economics (economic  
security)

THESIS  
for the degree of Doctor of Economics

Translation from Russian

Scientific consultant  
Doctor of Technology, Associate Professor  
Suslov Konstantin Vitalievich

Irkutsk – 2023

## CONTENTS

INTRODUCTION.....	4
<b>CHAPTER 1. METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ENERGY SECURITY EVALUATION AND IMPROVEMENT</b> .....	
SECURITY EVALUATION AND IMPROVEMENT .....	17
1.1. The evolution of the energy security concept .....	17
1.2. Methodological approaches to energy security assessment.....	31
1.3. Current trends in the energy security insurance methodology development....	57
<b>CHAPTER 2. ADAPTABILITY AS A FACTOR OF ENERGY SECURITY IMPROVEMENT</b> .....	
IMPROVEMENT.....	69
2.1. Essence of energy systems adaptability.....	69
2.2. The role of energy systems adaptability in ensuring energy security.....	84
2.3. Contemporary factors that determine energy systems adaptability .....	96
<b>CHAPTER 3. ASSESSMENT OF THE ENERGY SYSTEMS ADAPTABILITY</b> 111	
3.1. Principles and criteria for the energy systems adaptability assessment .....	111
3.2. Assessment of adaptability of alternative options for the energy systems' long-term development.....	121
3.3. The energy systems adaptability management in order to ensure the long-term energy security.....	140
<b>CHAPTER 4. ENERGY SYSTEMS ADAPTABILITY IMPROVEMENT: THE ROLE OF INVESTMENTS</b> .....	
4.1. Investments as a tool to improve the energy systems adaptability.....	156
4.2. Adaptability of investment projects in energy industry.....	169
4.3. Macroeconomic consequences of long-term investment deficit in the electricity industry.....	184
<b>CHAPTER 5. ENERGY SECURITY AS A FACTOR OF THE QUALITY OF LIFE IMPROVEMENT</b> .....	
5.1. The impact of energy security threats on the quality of life.....	193
5.2. Reducing the impact of energy security threats on the quality of life by the development of sustainable energy.....	205



5.3. Institutional tools to sustainable energy transition in Russia.....	217
CONCLUSION.....	239
REFERENCES.....	244
APPENDIXES.....	278

## INTRODUCTION

**Relevance of the research topic.** Despite the fact that Russia has huge reserves of energy resources, the problem of ensuring energy security remains relevant, which is caused, on the one hand, by new challenges and threats facing Russia, and on the other hand, by ongoing changes in the conditions for the functioning of national energy companies. Fundamental processes in the global energy and economy (including the emergence of a "green economy" and the development of sustainable energy, international economic integration, increased geopolitical tensions, digitalization of the economy and energy, the development of renewable energy sources, the growth of environmental requirements and the development of new technologies) combined with increasing uncertainty and risks of the functioning of the domestic economy and energy, as well as the moral and physical obsolescence of fixed production assets in the Russian fuel and energy complex, necessitate further development of the methodology for solving the strategic tasks of ensuring Russia's long-term energy security.

In today's rapidly changing environment, the main property of complex systems, ensuring their sustainable and dynamic development, is adaptability. Adaptability is defined as the ability of a system to "adjust" to changing external and internal conditions in order to achieve the originally set goal. The more viable and effective in terms of achieving the goals set a complex system is, the more adaptive it is. In order to ensure long-term energy security, it is justified to shift management from the current technical state of the systems, the physical reliability of production and transportation of energy resources to the construction of adaptive and sustainable energy systems.

Ensuring energy security by increasing the adaptability of energy systems to internal and external changes necessitates the development of methods for assessing the adaptive properties of energy systems, identifying growth factors for the adaptive properties of complex systems, expanding the theory of adaptability management. All these topics determine the aim and scope of thesis research.

**The degree of the scientific problem development.** Ensuring energy security attracted the attention of researchers during the energy crises of the 1970s and 1980s, when Europe faced a shortage of oil supplies, combined with a sharp increase in oil prices. In the last decade, due to the growth of geopolitical tensions, high volatility in oil prices, the fight against climate change and a number of other reasons, there has been a renewed interest of the world scientific community in energy security issue.

The multidimensionality of the problem of ensuring energy security determines the presence of a large number of indicators, indices and methods for assessment its level, which characterize the technical, socio-economic, financial, environmental and other aspects of the functioning of national energy systems. The works of B. Sovacool, J. Jewell, L. Hughes, P. Zweifel, D. Yergin, Ch. Winzer, A. Cherp, L. Molyneaux and others had a significant impact on the development of methodological tools for solving energy security problems. Their research results formed a basis of special methods for assessing and comparing the levels of energy security of countries and regions used by such international organizations as the World Energy Council (WEC), the World Economic Forum (WEF), the International Energy Agency (IEA), the Global Energy Institute (GEI).

In Russia, a significant contribution to the theoretical and methodological support of the energy security of the country and regions was made by V. V. Bushuev, F. V. Veselov, S. A. Voronina, A. A. Makarov, A. M. Mastepanov, T. A. Mitrova, A. S. Nekrasov, B. N. Porfiriev, N. I. Pyatkova, V. I. Rabchuk, V. V. Semikashev, S. M. Senderov, Yu. V. Sinyak, N. I. Suslov, O. V. Kondrakov and others.

Russia has large reserves of energy resources and a significant production potential of the fuel and energy complex, which makes it possible to extract primary energy resources not only for domestic consumption, but also for export. According to all the main indicators of energy security accepted in the world practice, Russia has a high level of energy security. At the same time, the studies of F. V. Veselov, A. A. Makarov, A. S. Nekrasov, B. N. Porfiriev, V. V. Semikashev, S. M. Senderov, N. I. Suslov, N. E. Terentyev show that the domestic fuel and energy complex has a

number of features and problems (a large unevenly populated territory; obsolescence of fixed production assets; technological backwardness of the Russian fuel and energy complex industries from world competitors, etc.), which, by reducing the ability of the Russian energy system to resist various kinds of stressful situations, pose threats to the long-term energy security of the country.

Predictive studies of Yu. D. Kononov, A. G. Korzhubaev, I. V. Filimonova, L. V. Eder, B. G. Saneev, A. E. Kontorovich and others made it possible to identify modern challenges faced by the national energy sector and find ways for solving the problems of energy security ensuring.

A lot of work on development of the theory of energy security assessment of the country and regions of Russia has been carried out at the Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS by such scientists as S. M. Senderov, L. V. Massel, V. I. Rabchuk, N. I. Pyatkova, N. I. Voropai and others. The main research result was the method for indicative analysis of the level of regions' energy security. Despite the high significance of the developed method, the assessment of the country's energy security is carried out mainly in the context of analyzing the risks of emergency situations in the energy supply of the regions, increasing the investment attractiveness of the electric power industry, ensuring the reliability and efficiency of the operation of energy systems, without taking into account the impact of the implementation of strategic threats to energy security on economic well-being and the quality of life. The problems of developing financial and economic mechanisms for long-term energy security support are also ignored. To study the impact of energy security threats on the quality of life, the works of J. Lambert, L. Lee, K. Pasten, M. S. Elam, J. Forester, V. Smil, A. Mayer and I. Smith were used, in which an analysis of the relationship between the quality of life, the level of energy consumption and the level of national energy security was carried out. The analysis of the problems of increasing the level of the country's energy security in the context of ensuring national economic security was carried out on the basis of the works of M. I. Krotov and V. K. Senchagov.

In the context of increasing geopolitical tension, the analysis of the mutual influence of geopolitics and energy from the standpoint of national and global energy security, carried out by A. A. Makarov, T. A. Mitrova, V. V. Kostyuk, A. M. Mastepanov, V. V. Bushuev, N. I. Voropai, V. V. Semikashev, A. Yu. Kolpakov, A. A. Shirov, is of particular importance.

The study of the adaptability property of energy systems was carried out on the basis of the research results by both domestic and foreign scientists. Among foreign studies, one can single out the works of such authors as L. Hughes, E. Sioshansi, L. Molyneaux, W. Lin, Y. Haimes, B. Walker, S. Vig and others, devoted to the problems of adaptability of energy systems. Among domestic researchers, significant results in the field of adaptability and stability analysis of energy systems were obtained by A. A. Makarov, L. A. Mierin, V. A. Smirnov, A. I. Karpovich and others.

When analyzing the adaptive properties of investment projects in the fuel and energy complex, the works of P. L. Vilensky, V. N. Livshits, D. S. Lvov, S. A. Smolyak and others were used.

Based on the analysis of the current state of research in the field of energy security insurance and trends in the energy sector and the economy, a **research hypothesis** was proposed: in the context of the need to ensure the accelerated economic development of the country, as well as the transition of Russia to a new model of socio-economic development transformation and balanced spatial and regional development, solving the problems of long-term energy security insurance can be carried out by the development of energy systems' adaptive properties.

The need to improve the validity and effectiveness of strategic decisions in the fuel and energy complex and solve the problems of ensuring the country's energy security by the development and implementation of assessment methods and ways to increase the adaptability of energy systems determines the relevance of the stated research topic and setting of its goals and objectives.

**The purpose and objectives of research.** The purpose of the research is the theoretical and methodological development of tools for managing the adaptability of

energy systems of various levels of organization to the changing conditions of their functioning in order to ensure the energy security of the country and regions.

To achieve the goal the following research tasks were set and solved:

- to analyze the theoretical foundations of the energy security concept, including the identification of the prerequisites for the emergence of the concept, the study of the stages and factors of its evolution, the analysis of the modern content of the term of "energy security";

- to determine the current directions for the development of the methodology for ensuring energy security based on an analysis of existing methodological approaches to assessing the energy security of the country and regions, current trends in the development of the economy and energy, as well as official views on ensuring the energy security of the country, reflected in the Energy security doctrine of the Russian Federation;

- to justify the need to develop methods and tools for managing the adaptability of energy systems in order to ensure the energy security of the country and regions;

- to identify factors that determine the level of adaptability of energy systems in modern conditions and analyze the principles and criteria for assessing the energy systems adaptability;

- to develop a method for assessing the level of adaptability and efficiency of alternative options for the long-term development of energy systems;

- to develop methods and tools for managing the adaptability of energy systems in order to ensure long-term energy security of the country and regions;

- to substantiate the importance of investments in the process of increasing the level of adaptability of energy systems, as well as to reveal the mechanism of the impact of the deficit of investment investments on the energy security of the country and regions;

- analyze the property of adaptability of investment projects in the energy sector in the context of the impact of the implementation of individual large-scale investment projects on the adaptive properties of energy systems;
- to analyze the mechanism of influence of threats to energy security on the quality of life of the population, as well as to substantiate the possibility of reducing this impact through the development of a "green economy" and sustainable energy.

**Field of study.** The research was carried out in the specialty 5.2.3 "Regional and sectoral economics" and corresponds to the direction 13 "Economic security", 13.6. "Problems and Mechanisms for Ensuring Energy Security".

**The object of research** is the fuel and energy complex as a key factor in sustainable socio-economic development.

**The subject of the study** is the adaptability property of energy systems as a tool for ensuring the energy security of the country.

**The theoretical basis of the study** is the scientific papers of foreign and domestic researchers devoted to the problems of ensuring energy security, assessing the level of adaptability of complex systems, the problems of forecasting the development of the country's fuel and energy complex, the formation of state energy policy, methods of investment analysis in the fuel and energy complex, methods of identifying and managing the risks of the functioning of companies in the energy sector and etc.

**The methodological basis** of the study is general scientific and special research methods: methods of system analysis, methods of economic and statistical analysis (statistical observation, correlation and regression analysis, analysis of time series), methods of economic and mathematical modeling, methods of expert assessments, quantitative methods of financial and investment analysis and etc. Processing of statistical data was carried out using such applied software products as Microsoft Excel and Microsoft Visio. Separate calculations illustrating the relationship between the economy and energy were carried out on the basis of the intersectoral optimization model MIDL developed at the MESI SB RAS.

**The information base of the study** was made up of legislative and regulatory acts of the Russian Federation, official data of the Federal State Statistics Service, presented in the collections "Russian Statistical Yearbook", "Regions of Russia", "Industry of Russia". The author used data published in domestic and foreign scientific publications, periodicals, materials of scientific and practical conferences and seminars, as well as data obtained by the author independently as a result of the analysis of available statistical information.

In addition, data from analytical reports and policy documents of the Government of the Russian Federation, the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, the Ministry of Energy of the Russian Federation, the Ministry of Economic Development of the Russian Federation, as well as statistical collections of the International Energy Agency (IEA), BP, the International Energy Forum (IEF) and etc. were taken into account.

**The scientific novelty** of the research consists in the development of methodological approaches to managing the adaptive properties of energy systems at different levels of organization in the face of increasing risks of realizing threats to the energy security of the country and the need to improve the quality of life.

**The most significant research results** obtained by the author:

- on the basis of the identified factors in the evolution of the concept of energy security, an author's approach to its periodization is proposed, which made it possible to clarify the content of the term of "energy security";
- the conclusion is made about the difference in approaches to assessment and in the ways of ensuring energy security between countries net importers and net exporters of energy resources;
- the need to integrate into the algorithm for solving the problems of ensuring the long-term energy security of the country such elements as the analysis of adaptability, analysis of the investment attractiveness of the economy and energy and analysis of the impact of the implementation of threats to energy security on the quality of life is substantiated;



- a set of factors were discovered that determine the level of energy systems adaptability in modern conditions;
- a change in the factors that determine the level of energy systems adaptability under current situation is revealed;
- the principles of adding new elements and interconnections to the national energy system are formulated when developing an energy policy aimed at increasing the adaptability of the national energy system. Methods of direct and indirect control influence on the national energy system are identified and described, allowing to increase the level of its adaptability;
- a method was developed for assessing the level of adaptability and efficiency of options for the long-term development of energy systems in order to increase the validity of the adopted energy development strategies;
- the mechanism of the positive impact of investments on the adaptive properties of energy systems are identified;
- the mechanism of long-term self-reinforcing process of deploying a strategic threat of a shortage of investments in the energy sector, accompanied by a drop in the adaptive properties of energy systems, is disclosed. The macroeconomic consequences of the investment deficit are analyzed;
- disclosed and formally described the property of adaptability of investment projects in the fuel and energy complex in the context of the impact of the implementation of individual large-scale investment projects on the adaptive properties of energy systems. A method for evaluating the effectiveness of investment projects in the fuel and energy complex is proposed, taking into account the marginal prices for energy carriers;
- the mechanism of energy security threats' influence on the quality of life are revealed. A method for assessing the risks of reducing the quality of life level as a result of the implementation of strategic threats to energy security is proposed;
- the possibility of reducing the impact of threats to energy security on the quality of life by the development of sustainable energy, contributing to the

improvement of the adaptive properties of the fuel and energy complex, is substantiated.

**The validity and reliability** of the scientific statements, conclusions and recommendations contained in the thesis is ensured by the correctness of the application of a combination of scientific methods and approaches; using official statistical materials of Russian and international organizations; studying the theoretical and practical research results of domestic and foreign scientists published in scientific journals, reports and monographs; presentation of the results obtained at international and all-Russian conferences. The relevance of the study, the validity of the methods used and approaches to the tasks being solved, as well as the reliability and significance of the results obtained were confirmed by experts from the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Science Foundation, who expertise the results of research projects were led by the author and supported by these funds. The main results presented in the thesis were obtained during the work on these projects.

**Theoretical and practical significance of the research.** According to Academician L. A. Melentiev, system research in the energy sector should develop in two directions: theoretical, including the analysis of the main properties of energy systems and the creation of methods and ways for studying them, and applied, aimed at creating methods for optimal control in the energy sector, solving complex intersectoral energy problems, etc. The results obtained in the framework of the study have both theoretical and practical significance. Theoretical significance of the results obtained is ensured by the increment of scientific knowledge in the field of functioning of large energy systems by establishing the general patterns of their development in the face of increasing risks of country's energy security and the need to improve the quality of life. The practical significance of the research results is determined by the development of existing methods for making optimal decisions in the fuel and energy complex to ensure the country's energy security and improve public administration in this area.

The research results can be used as:

- methodological recommendations for the preparation of analytical materials when making strategic decisions in energy complex, as well as in the development and implementation of state energy policy to create a risk management system in the field of energy security, optimize the financial burden on energy companies and attract investments;
- educational and methodological developments on the functioning of modern energy systems and solving problems of ensuring the energy security of the country.

**Approbation of the research results.** The research results were discussed at international and all-Russian conferences, forums and symposiums: the international conference on industrial engineering and modern technologies "FarEastCon-2020" (Vladivostok, October 6-9, 2020); VII International Scientific and Practical Conference "Sustainable Development: Society and Economy" as part of the IV International Economic Symposium (St. Petersburg, June 25-27, 2020); international conference "Theoretical and practical aspects of public finance", (Czech Republic, Prague, April 12-13, 2019); international conference on industrial engineering and modern technologies "FarEastCon-2018" (Vladivostok, October 2-4, 2018); international seminar "Critical infrastructures: situational management, intelligent, agent, cloud computing and cybersecurity" (Irkutsk, March 17-24, 2018); XIV international scientific and practical conference "Development of territorial socio-economic systems: issues of theory and practice" (Yekaterinburg, December 15-16, 2016); international scientific and practical conference "Actual trends in the development of the world economy" (Irkutsk, March 15-16, 2016); XIII international scientific and practical conference "Development of territorial socio-economic systems: issues of theory and practice" (Yekaterinburg, October 29-30, 2015); VII All-Russian scientific and technical conference with international participation "Energy: management, quality and efficiency of use of energy resources" (Blagoveshchensk, June 2013); international conference "Energy of Russia in the 21st century: development strategy - the eastern vector" (Irkutsk, September 1-3, 2010); international conference "Strategic Directions for Sustainable Development of

the Baikal Region" (Irkutsk, 2010); IX All-Russian Conference "Actual Issues of Economics and Sociology" (Novosibirsk, October 21-23, 2013); VIII All-Russian autumn conference "Actual issues of economics and sociology" (Novosibirsk, November 19-21, 2012).

The research underlying the thesis was supported by grants from the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Science Foundation. The following projects were implemented under the guidance of the author:

– “Methods for assessing and ways to improve the adaptability of energy systems in order to increase the effectiveness of strategic decisions for the development of the fuel and energy complex and increase the energy security of the country” (supported by the RFBR grant No. 17-06-00102-a, 2017-2019, state registration number in FGANU TsITiS AAAA -A17-117040710126-2);

– “Methods and macroeconomic indicators for assessing the risks of strategic threats to energy security in the context of improving the quality of life” (supported by the RSF grant No. 19-78-00007, 2019-2021, state registration number in FGANU TsITiS AAAA-A19-119072290023-4) .

Some scientific results were obtained by the author with participation in the implementation of the following projects supported by RFBR grants: “Development of methodological tools and study of the influence of the nature of the uncertainty of future conditions on the efficiency and feasibility of options for the development and modernization of energy systems” (No. 12-06-00090-a); “Modeling and long-term forecasting of prices and demand in regional energy markets in the face of increasing complexity of the relationship between energy and the economy and growing uncertainty” (No. 13-06-00303-a); “Modeling and long-term forecasting of market demand for energy resources in the context of growing sectoral heterogeneity and territorial unevenness of economic development” (No. 16-06-00230-a); “Influence of the prospect under consideration and the growth of uncertainty on the choice of acceptable methods for solving problems of long-term forecasting” (No. 16-06-00091-a); "Methods for assessing and taking into account new trends and growing uncertainty in the relationship between energy and the economy to improve the

validity of strategic decisions" (No. 18-010-00176-a); "Methodology and methods for quantifying the long-term impact on the regional energy markets of the digitalization of the economy and energy and increasing the role of active consumers and distributed generation" (No. 20-010-00204-a).

The research results, obtained during the implementation of projects supported by grants from the Russian Science Foundation and the Russian Foundation for Basic Research, received a positive assessment from the experts of the foundations.

**Publications on the research theme (topic).** The research results are reflected in 24 articles and 1 monograph with a total volume of 25.95 pp. (including the author's 22.65 pp.), including 17 articles published in leading peer-reviewed scientific journals, determined by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, and 8 articles published in journals included in international citation databases SCOPUS and WOS.

**Structure and scope of work.** The thesis consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references. The text of the dissertation is presented on 283 pages and includes 38 tables, 68 figures. The bibliographic list includes 363 titles.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, the degree of scientific development of the problem, formulates the goals and objectives of the study, shows the theoretical and practical significance of the work, defines the subject, object and methodological basis of the study, shows the theoretical and practical significance of the research, highlights the main elements of scientific novelty and the most significant results obtained by the author.

The first chapter "Methodological approaches to the energy security evaluation and improvement" considers the evolution of the energy security concept and identifies the main factors and events that determined this evolution, analyzes the existing methodological approaches to assessing energy security of Russia.

In the second chapter "Adaptability as a factor of energy security improvement", the role of adaptability in the process of energy security ensuring was studied and

contemporary factors that determine the level of energy systems adaptability are identified.

In the third chapter “Assessment of the energy systems adaptability”, the principles and criteria for assessing the adaptability of energy systems are analyzed, which made it possible to develop a method for assessing the level of adaptability and efficiency of alternative options for the long-term development of the energy system. The formulated principles of adding new elements and relationships to the national energy system when developing an energy policy aimed at increasing the adaptability of the system, as well as the identified and described methods of direct and indirect control impact on the energy system, which increase the level of its adaptability, made it possible to develop the theory of energy system adaptability management in order to ensure the long-term energy security of the country.

In the fourth chapter "Energy systems adaptability improvement: the role of investments" the role of investments in the energy sector in forming the energy systems adaptability is analyzed. The property of adaptability of investment projects in energy complex is described in the context of the individual large-scale investment projects impact on the adaptive properties of energy systems. The mechanism of influence the investments deficit on the country's energy security is revealed. Macroeconomic consequences of the investment deficit are analyzed.

In the fifth chapter “Energy security as a factor of the quality of life improvement”, the impact of threats to energy security on the quality of life is analyzed. The possibility of reducing this impact by the development of sustainable energy is substantiated, and institutional ways to solve the problems of establishing sustainable energy in Russia are proposed.

In Conclusion, the results of the study are summarized.

## **CHAPTER 1. METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ENERGY SECURITY EVALUATION AND IMPROVEMENT**

### **1.1. The evolution of the energy security concept**

Since energy is a key factor in the functioning of modern society, the concept of energy security, as well as methods for assessing it and ways to improve it, are the subject of active discussion and intensive research. Despite the apparent simplicity and obviousness of the concept of energy security, over time, the content of the concept of energy security has undergone significant changes.

The consumption of energy resources has always accompanied the existence of any society, however, only with the beginning of the industrial revolution, the role of energy has become key in ensuring sustainable socio-economic development. As a result of the industrial revolution that began in England in the mid-1700s, coal began to replace biomass as the main source of energy. Between 1650 and 1740, the real price of timber increased significantly, which contributed to its gradual replacement by coal [238]. During the 18th century, many industries completely replaced wood with coal, and by the beginning of the 19th century, heating services switched from organic biomass to fossil fuels. During this period, for the first time, the understanding came that control over the sources of fossil fuels is a decisive factor in the successful conduct of wars and the sustainability of production, transport and communication systems.

The sharp increase in coal consumption in the 19th century raised concerns about the possible consequences of its shortage on the production process [269]. W. S. Jevons, a well-known British economist, who also became one of the founders of the theory of marginal utility, made a significant contribution to the development of energy economics with his work “The coal question”, which examines the fundamental issues of energy efficiency and the use of energy resources. Jevons W. S. argued that since the growth of industry in Great Britain was based on cheap coal,

its growing cost, associated with the need to develop ever deeper deposits of coal, threatened economic stagnation. The pessimistic view of W. S. Jevons on the energy security of the UK economy was expressed in the fact that, in his opinion, neither the development of technology nor the use of other energy resources will eliminate this threat to the economic development of the country. W. S. Jevons revealed the effect that increasing the efficiency of the use of natural resources such as coal only generates an increased demand for this resource, and not a decrease in demand for it, as one might expect ("The Jevons Paradox"). Despite the fact that W. S. Jevons did not consider the environmental and social problems of the depletion of coal reserves in the UK and in the world, underestimated the role of oil and hydropower as an alternative to coal, his work made a significant contribution to the development of the theory of energy economics and ecology, and also served as the beginning of the study of issues of ensuring energy security of the country.

In the first half of the 20th century, interest in ensuring energy security was manifested to a greater extent in relation to providing fuel and energy to the armies to maintain their combat capability. D. Yergin describes how the fuel supply crisis in Great Britain at the end of 1916 forced the country's government to introduce a policy of fuel rationing, stimulated the development of a coherent national oil policy and aroused interest in energy security issues [360, p. 176].

Along with Great Britain, other countries also faced fuel supply problems by the end of the First World War. As a result, in February 1918, an international conference was held, in which the United States, Great Britain, France and Italy took part, with the aim of coordinating and controlling all oil supplies among the allied countries. The developed logistics system, together with the introduction of enhanced security for oil tankers, solved the problem of oil supplies until the end of the First World War. On the eve of World War II, this issue again became topical, and in 1937, realizing the strategic role of oil, the British government initiated work on analyzing the reliability of oil supplies to the country for the purposes of military planning [360, p. 366].



At the beginning of World War II, the problem of providing fuel to national economies and armies became even more acute, due to a sharp increase in the number of vehicles, aircraft, and submarines involved in hostilities, as well as the growth of energy-intensive industrial production. Thanks to mass mechanization, global demand for oil more than tripled from the end of World War I to the start of World War II.

Germany, which in the 1930s was heavily dependent on imported oil, but at the same time had large reserves of coal, in preparation for war, began to actively produce synthetic fuels to ensure its energy security. By the beginning of World War II, coal-based synthetic fuels met almost half of the country's oil needs [206]. However, because the infrastructure needed to produce synthetic fuels was complex, expensive, and vulnerable to air attacks, the production of synthetic fuels did little to increase Germany's energy security.

During the Suez crisis in 1956, the dependence of the economies of Great Britain and Western Europe on the stability of oil supplies from the Middle East became obvious [209]. It was during this period, when solving the problem of providing the economy with energy resources becomes one of the most urgent economic and political tasks, so the concept of energy security arises.

The academic development of the concept of energy security began in the 1960s. One of the first works directly devoted to the problem of ensuring energy security was an article by H. Lubel [297] "Reliability of supply and the energy policy of Western Europe", in which the author considers the trend towards an increase in the risks of interruption in oil supplies to Western Europe due to the rapid growth of both the amount of oil consumed and its share in the energy balance. H. Lubel noted that the risk of interruption in oil supplies for the countries of Western Europe is much higher than for the USA and the USSR, which had their own large reserves of this hydrocarbon. A rapid increase in oil consumption in Western Europe began a few years before the publication of the mentioned article.

The next impetus that served to further develop the concept of energy security was the oil crisis of 1973-1974, when OPEC member countries imposed an embargo

on oil supplies to countries that supported Israel in the war with Syria and Egypt. As a result, oil prices almost quadrupled in a year. In addition, in the period from 1976 to the mid-1980s, the nationalization of the oil industries in most oil-producing countries in the Middle East, accompanied by a rapid rise in oil prices and subsequent economic recession.

These developments raised serious concerns about the security of oil supplies. Scientific research in the 1970s–1990s in the field of providing energy resources to the economies of countries, to a greater extent, affected the problems of the functioning and efficiency of world energy markets. In general, one can note the unity of the semantic content of the concept of energy security, which is characteristic of this period, as the reliability and uninterrupted supply of oil, combined with price stability. So [225] writes that the essence of the problem of ensuring the energy security of the United States and other countries of Western Europe lies in the vulnerability of oil supplies, as well as in the possible sharp increase in oil prices as a result of these interruptions.

In the book “Economics of Energy Security” [218], which combined the results of studies over the previous 20 years on the problems of ensuring energy security, the authors give the following definition: energy security is associated with possible economic losses as a result of changes in the price of energy resources or their availability. Despite the fact that when defining energy security, the authors talk about energy resources in general, oil plays a key role in their research. D. A. Deese [229], T. Berglund and L. Moden [213] adhered to a similar point of view regarding the interpretation of the concept of energy security. In their opinion, the country's energy security is determined by its ability to obtain uninterrupted energy resources at an affordable price.

In the same vein in the early 1990s, the level of US energy security is analyzed by G. C. Georgiou [242]. According to his research, given the structure of energy production and consumption in the 1980s, oil was seen as a key source of energy in the 21st century. both for the United States and for the whole world, and the greatest risks to US energy security were associated with crises in the international oil market.

P. Zweifel and S. Bonomo [363] name the main risks of national energy security as interruptions in the supply of oil and gas to the country. Scientists are analyzing the possible consequences of the realization of the risks of interruptions in the supply of energy resources that the national economy is facing, and they call the reservation of energy resources one of the most effective ways to reduce the risks of energy security. The International Energy Agency (IEA) has recommended that countries have 90 days of oil and gas reserves in case of a power outage. This period was a kind of compromise between ensuring energy security and the costs associated with the storage of reserves. The scientists justified the need to increase the volume of reserves, since the IEA's earlier analysis of the risks of interruptions in the supply of oil and gas did not take into account the likelihood of a simultaneous interruption.

After the stabilization of world oil prices and the decrease in the likelihood of oil embargoes, the activity of scientists involved in solving the problems of ensuring energy security significantly decreased until the end of the 2000s. A surge of interest in scientific and political circles to the problem of assessing and ensuring energy security in the late 2000s was due to a number of reasons:

1. Growth of political instability in the world, caused by such events as the terrorist attack in the United States in 2001, the “color revolutions” in Yugoslavia (2000), Georgia (2003), Ukraine (2004), nuclear tests in the DPRK (2006, 2009), a military clash in South Ossetia (2008), etc.

2. War in Iraq (2003). The formal reason for the invasion was the need to destroy weapons of mass destruction and overthrow the regime of Saddam Hussein, who maintained ties with international terrorism. This military conflict led to the destabilization of the political situation in the region and exacerbated the problems associated with ensuring the reliability of oil supplies from the Middle East.

3. Increasing cases of emergency power outages and destruction of production facilities caused by extreme weather conditions:

- on September 19, 2003, Hurricane Isabel caused power outages in nine US states;

- on September 28, 2003, a storm caused a tree to fall and damaged a power line connecting Switzerland and Italy. The resulting power outage affected almost all of Italy and parts of Switzerland;

- in late August 2005, Hurricane Katrina severely damaged oil production and refineries in the Gulf of Mexico in the United States.

4. Disagreements on the issues of gas transportation between Russia and Ukraine (2005-2006), which caused concern in European countries about the reliability of gas supplies from Russia. This circumstance led to practical changes in their energy policy.

5. A sharp increase in oil prices by 2008. A period of relative stability in oil prices since the mid-1980s to the end of the 1990s was replaced by a period of their sharp growth. From 1999 to 2008, the price of oil increased by more than 6 times. The subsequent two-year period of falling prices was again replaced by a period of growth, and already in 2011 the price of oil reached \$111 per barrel of Brent. Interest in the problem of energy security was fueled not only by rising oil prices, but also by their strong fluctuations, combined with the difficulty of predicting further dynamics.

6. Rapid growth in demand for energy resources in Asian countries, which created a situation of redistribution of world energy flows. The share of China in the world consumption of energy resources for the period from 1991 to 2008 increased from 8.8% to 19%, while in absolute terms China's energy consumption increased 3 times. The share of Asia-Pacific countries in the world consumption of energy resources over the same period increased from 22.3% to 36.7%.

7. The global financial and economic crisis of 2008, which caused a sharp increase in interest in issues of economic and financial security, which began to be considered, among other things, in the context of ensuring the reliability of the supply of energy resources.

8. Accident at the Fukushima-1 nuclear power plant in Japan (2011). This accident, initially caused by natural disasters (an earthquake and the subsequent tsunami), had an impact on the international gas market as Japan and other countries reconsidered the role of nuclear power. As a result of the natural disaster, natural gas

consumption growth in Japan was 11.6% in 2011 and 10.8% in 2012. The Japanese government sought to significantly reduce the role of nuclear power, as a result, electricity generation at nuclear power plants declined sharply over the next 2 years and amounted to 0 kWh in May 2012. Only since 2015, Japan began to produce electricity at nuclear power plants, although the volume of electricity generated at nuclear power plants is not comparable to pre-accident: 294.2 billion kWh in 2010 against 29.1 billion kWh in 2017. Following Japan, Germany has significantly reduced the amount of electricity produced at nuclear power plants (from 140.6 billion kWh in 2010 to 75.9 billion kWh in 2017).

As L. Chester [222] notes, despite the existence of studies on the problems of ensuring energy security, the concept of energy security was not clearly articulated, but rather understood intuitively until 2005, when works began to appear aimed at its theoretical development [277, 358]. In addition, as D.A. Baldwin shows [208], in the 1990s the very concept of national security, within which energy security is defined, has been blurred.

In 2018, Zhou W. [361] and colleagues analyzed the number (Fig. 1.1) and content of publications devoted to various aspects of the problem of ensuring energy security and reflected in international citation databases. Most of the considered publications are not theoretical, but applied in nature, and cover such areas as [203]:

- ensuring the energy efficiency of the economy;
- development of energy systems infrastructure;
- assessment of the socio-economic consequences of interruptions in the supply of energy resources;
- assessment of the impact on the energy sector and the economy of the country or region of fluctuations in prices for energy resources;
- development of an effective energy policy of the state.

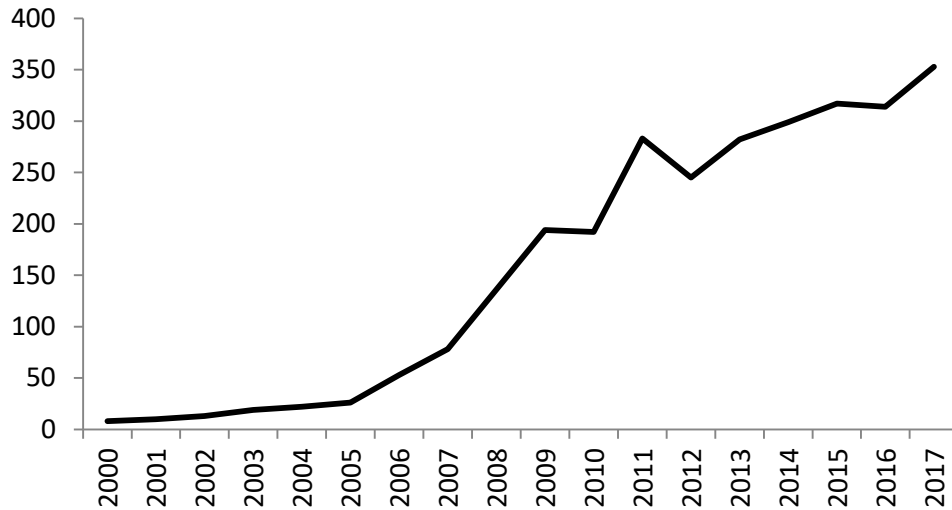


Figure 1.1 – Number of publications on energy security issues reflected in the Web of Science database

Source: [361]

Articles on the topic of energy security, as a rule, relate to one or more of the above topics and relatively rarely touch exclusively on the theoretical development of the concept of energy security.

In addition to the above reasons, the development of the concept of energy security was stimulated by the shift in the paradigm of socio-economic development that began in the 2000s [246, 338, 339, 340]. The concept of energy security began to cover such areas as environmental security, energy poverty and sustainability of economic development. The active expansion of the concept of energy security and the inclusion in it of new aspects of the functioning of the energy sector and the economy has been traced since 2005 - after the entry into force of the Kyoto Protocol, which obligated developed countries and countries with economies in transition to limit and reduce greenhouse gas emissions in accordance with individual targets. If previously only two aspects of energy security were key - the availability of energy resources and their cost, now their list has been supplemented by environmental acceptability and reliability of supplies. These aspects of the concept of energy security began to be called "4A" ("the four As of energy security", according to the first letters of the names of the key components):

- availability - physical availability of energy resources;
- affordability - economic acceptability of the energy carrier price;
- accessibility - physical availability of energy resources;
- acceptability - environmental acceptability of the use of an energy carrier.

For the first time, this approach to the content of the concept of energy security was described in a report on the problem of ensuring energy security in Asia, prepared by APERC (Asia Pacific Energy Research Center) in 2007 [206]. Later, within the framework of the “4A” approach, studies were carried out [277], which proposed a number of indicators of energy security, and analyzed the relationship of four aspects of energy security with four global trends in the development of the economy and energy: globalization, regionalization, environmental friendliness and economic efficiency (Fig. 1.2).

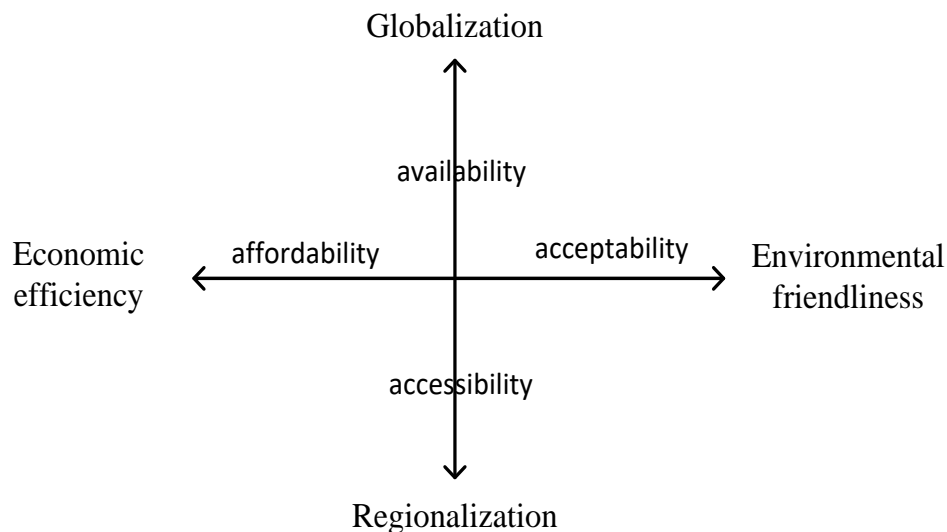


Figure 1.2 – Four aspects of energy security and their relationship with global trends in the development of the economy and energy

Source: [277]

As can be seen from fig. 1.2, some aspects of energy security may be in conflict with each other. So, for example, a decrease in the price of energy resources may be associated with a decrease in environmental standards for hydrocarbon production (and not with an increase in the efficiency of production and transportation), and vice

versa, an increase in environmental standards for the production and consumption of energy resources leads, other things being equal, to an increase in their price.

Not all researchers of energy security issues adhere to the “4A” approach: some authors either exclude one or another item from the list above or, on the contrary, include additional ones. For example, L. Hughes [259] considers three aspects of energy security: the availability of energy resources (availability), their cost (affordability) and environmental acceptability (acceptability). B. Sovacool [341] identifies five aspects of energy security:

- availability of energy resources (availability);
- the cost of energy resources (affordability);
- technological development and efficiency - this includes the quality of the supplied energy, the development of innovative energy technologies, etc.;
- social and environmental acceptability (environment and social sustainability) - this includes minimizing environmental damage, reducing CO<sub>2</sub> emissions, minimizing social discontent, etc.;
- the energy policy of the state (regulation and governance) - a transparent, stable energy policy aimed at developing energy markets and supporting the introduction of new technologies is one of the parameters that ensure energy security.

Not all researchers agree with the basic principles of the 4A approach. So A. Cherp and J. Jewell [220] criticize him for not answering three basic questions:

1. From whose perspective should energy security be considered?
2. What values are involved in ensuring energy security?
3. What threats to energy security are taken into account?

A. Cherp and J. Jewell propose to replace the “4A” approach to determining the level of energy security with an approach based on assessing the level of vulnerability (vulnerability) of key energy systems. Key energy systems are understood as such energy systems that ensure the functioning of socially significant objects and systems. Key energy systems can be delineated according to geographic and sectoral boundaries. The level of energy security in the proposed approach is inversely proportional to the level of vulnerability of key energy systems to stresses of various



nature. Scientists believe that such an approach will be more productive in solving energy security problems, since it more clearly outlines the subject area of the study. However, in general, despite criticism, the “4A” approach remains quite common.

A significant impact on the development of the concept of energy security in the period from 2011 to the present has been the emergence and development of the concept of sustainable development, based, among other things, on the idea of sustainable energy.

The integration of sustainable energy principles into the concept of energy security was first reflected in the principles of ensuring US energy security, formulated and applied in its activities by the US Department of Energy:

1. Development of flexible, transparent and competitive energy markets, including gas markets.
2. Diversify energy resources, sources and routes and encourage the development of local sources of energy supply.
3. Reducing greenhouse gas emissions and accelerating the transition to a low carbon economy as a key contribution to sustainable energy security.
4. Increasing the energy efficiency of demand.
5. Promote the introduction of clean and sustainable energy technologies and further investment in research and innovation.
6. Improving the resilience of energy systems by promoting infrastructure upgrades to help withstand systemic shocks and cyberattacks.
7. Implementation of emergency response systems, including reserves and fuel substitution for importing countries in case of major power outages.

Despite the fact that, at first glance, the tasks of establishing sustainable energy are not directly related to the tasks of ensuring energy security, and may even contradict each other, modern studies of these areas are increasingly intertwined. At present, the development of the concept of energy security is aimed not only at leveling the short-term consequences of interruptions in the supply of energy resources, but also at the long-term maintenance of the provision of society with energy through the development and implementation of the principles of sustainable

energy [191, 217, 320]. A situation has arisen where, on the one hand, the development of the fuel and energy complex in accordance with the principles of sustainable energy is seen as a way to improve energy security, and on the other hand, ensuring the long-term energy security of countries is seen as one of the criteria for the development of sustainable energy.

An analysis of the evolution of the concept of energy security (Table 1.1) showed that since the inception of this concept to the present day, it has undergone significant changes towards a gradual expansion of the object of its content, which was caused by factors such as [107]:

- economic development of society (complication of relationships between economic entities, structural changes in production, etc.);
- technological development of society (the emergence of new energy-intensive technologies and industries, the growing role of technology in ensuring the welfare of society, etc.);
- socio-political changes (increased requirements for the quality of life of the population, etc.).

Table 1.1 – The evolution of the concept of energy security

Events that gave impetus to the development of the concept of energy security	Key provisions of the concept of energy security
from 1866 to 1914	
The Industrial Revolution led to a dramatic increase in energy consumption.	Energy security was determined by the presence of easily recoverable reserves of coal, which was the main energy resource
from 1914 to 1961	
World wars and other military conflicts; rapid growth in industrial production.	Energy security was determined by the presence of hydrocarbon reserves in the country and the reliability of their foreign supplies. Energy security was considered mainly in the context of a practical solution to the problems of fuel supply to the economy and the army in the context of military conflicts. Coal and oil were the main energy resources.
from 1961 to the 1990s	
Oil crisis of 1973; sharp rise in oil prices.	Energy security was determined by the presence of hydrocarbon reserves in the country, the reliability of their foreign supplies and the price of energy resources.
since the 1990s to the 2000s	
Growing public interest in environmental issues; adoption in	Energy security was determined by the presence of hydrocarbon reserves in the country, the reliability of

1992 and entry into force in 1994 of the UN convention on climate change; development of environmental taxation; adoption of the Kyoto Protocol in 1997	their foreign supplies, the price of energy resources and their environmental safety. Formation of the “4A” approach within the framework of the concept of energy security.
since the 2000s to the present	
Changing the paradigm of socio-economic development of developed countries: focus on the practical use of the principles of sustainable economic development and sustainable energy (introduction of carbon taxes, adoption of the Doha Amendment to the Kyoto Protocol).	Development of the concept of energy security in the direction of including in it such areas as the quality of life of the population, combating climate change, combating energy poverty, focusing on the diversification of energy sources.

Source: compiled by the author

The evolution of the concept of energy security determines the semantic content of the term energy security. Accordingly, at present there are a fairly large number of definitions of the term energy security that have emerged as a result of the development of the concept. B. Sovacool [335] gives a list of 45 definitions of energy security given by various scientists and organizations. Most of them are built on the principle of combining the basic elements of the "4A" approach with additional elements of interest in conducting specific studies. The most common and widespread interpretations of the concept of energy security are given in Table. 1.2 and are arranged from the narrower content of the concept to the broader one.

Table 1.2 – Energy security definitions

Source	Energy security definitions
Blyth [216]	Energy security is determined by the low risks of interruptions in the supply of affordable energy resources.
Blum [217]	Energy security is the ability of an economy to provide sufficient, affordable and environmentally sustainable energy services to maintain a position of maximum shared prosperity even in times of crisis.
Beletsky [214]	Energy security is determined by the reliability and adequacy of the supply of energy resources at reasonable prices.
Drexel [230]	Energy security is the ability to withstand adverse impacts caused by natural, accidental or intentional events affecting energy supply and distribution systems and utilities. Energy security is ensured when systems for the extraction, production and distribution of energy resources, as well as end-use devices, have five characteristics: availability, survivability, availability, sufficiency and sustainability.
Martišauskasa [300]	Energy security is determined by the uninterrupted supply of energy resources at an affordable price.

Jeong [268]	Energy security is a certain level of security of public access to fossil fuels with no market collusion in the market for a period of at least 10 years.
Senderov [164]	Energy security is the state of protection of citizens, society, the state, the economy from the threat of a shortage in meeting their energy needs with economically available energy resources of acceptable quality, as well as from disruption of uninterrupted energy supply.
Fortov [191]	Energy security is the reliable supply of the economy with all types of energy without excessive damage to the environment and at prices that reflect basic economic principles.
Energy Security Doctrine of the Russian Federation [1]	Energy security is the state of protection of the country's economy and population from threats to national security in the energy sector, which ensures the fulfillment of the requirements for fuel and energy supply of consumers stipulated by national legislation, as well as the fulfillment of export contracts and international obligations of the country <sup>1</sup> .
IEA [236]	Energy security is the ability of the energy system of a certain country to quickly and best respond to changes in the balance of supply and demand, as well as dynamically develop in accordance with economic development and the need to preserve the quality of the environment.
Cherp [221]	Energy security is the low vulnerability of vital (key) energy systems.

Source: compiled by the author

After analyzing the existing definitions of energy security and considering the dynamics of the development of the concept, we can conclude that the basic content of the concept of energy security, related to the reliability and availability of energy supplies, is expanding depending on the objectives of the study, as well as on geographical, political and socio-economic characteristics, development level of the country or region in question. As additional components usually act:

- the presence of hydrocarbon reserves and their diversity by type;
- the presence of energy-intensive industries within the considered country or region;
- long-term and/or short-term nature of the consideration;
- improving the environmental situation and combating climate change;
- level of diversification of energy resource suppliers to the country;
- energy efficiency of the economy.

<sup>1</sup> The content of the concepts of national and economic security is disclosed in such official documents as the Decree of the President of the Russian Federation of May 13, 2017 N 208 "On the Strategy for the Economic Security of the Russian Federation for the period until 2030" and the Decree of the President of the Russian Federation of July 2, 2021 N 400 "On the National Security Strategy of the Russian Federation".

At the same time, for countries characterized by dependence on energy supplies from other countries, in defining energy security, it is more common to focus on the reliability of supplies, diversification of the energy balance, development of renewable energy sources, and, most importantly, on reducing the risks of possible interruptions in the supply of energy resources. For countries with large hydrocarbon reserves, the emphasis is more on the long-term problems of developing energy systems (providing universal access to energy, reducing traditional external energy markets and entering new energy markets, strengthening the climate component of international energy policy), increasing energy efficiency, developing clean hydrocarbon energy technologies, as well as to provide investments to the fuel and energy complex.

In the framework of this study, the author, sharing the position of S. I. Senderov, will adhere to the following definition of energy security: energy security is the state of protection of citizens, society, the state and the economy from the threat of a shortage in meeting their energy needs with economically accessible energy resources of acceptable quality, as well as from disruption of uninterrupted power supply.

## **1.2. Methodological approaches to energy security assessment**

The multidimensional nature of the concept of energy security currently causes the presence of a large number of indicators, indices and methods for assessing its level, which characterize the technical, socio-economic, financial, environmental and other aspects of the functioning of national energy systems. So B. Sovacool [332], after analyzing the scientific and practical literature on methods for assessing and analyzing energy security, identifies 320 simple and 52 complex indicators, which he mentioned as indicators used in the analysis. It should be noted that a large number of indicators cited by B. Sovacool (both simple and complex) are indirectly related to the task of directly assessing energy security. Such indicators, for example, are: exchange rate fluctuations, number of cars in the country, average household electricity costs, average annual household electricity consumption, average car

mileage per year, annual sales of air conditioners (refrigerators, computers, etc.), taxes on carbon dioxide emissions, public dissatisfaction with the construction of new power plants, etc.

From the whole set of existing indicators, one or another author chooses those that are most adequate to the goals of his research, and then, as a rule, by expert means, ranks them in order of significance. An analysis of the scientific literature on the problems of assessing energy security, conducted by B. Ang, shows a large spread in the number of indicators used in different methods. The number of energy security indicators used in each specific study varies from one to 68. About 75% of studies devoted to the assessment of energy security are based on the use of no more than 20 indicators. So E. Cox uses 18 indicators [227], S. Filipovich - 9 [239]. E. Kizel uses 27 indicators [274], M. Scheepers et al. in their work give 63 indicators [326], and J. Augutis et al. [207] - 68 indicators for assessing energy security. Studies covering more than 40 indicators tend to use a large number of specific technical indicators.

The main simple indicators characterizing the energy security of a country or region are the following [95, 97]:

1. The ratio of the volume of extracted energy resources with the volume of their explored reserves. This indicator characterizes the security of the future needs of the region's economy in fossil fuels:

$$RPI_i = \frac{P_i}{R_i} \quad (1.1)$$

where

$RPI_i$  is the number of years for which the reserves of the  $i$ -th energy resource will last;

$R_i$  is the volume of production of the  $i$ -th energy resource per year;

$P_i$  is the volume of explored reserves of the  $i$ -th energy resource.

For an objective assessment of fossil fuel consumption and changes in the volume of its proven reserves, the analysis should be carried out over a number of years. This indicator is a basic indicator in the analysis of the country's energy

security level and corresponds to the "availability" criterion in the "4A" approach, that is, it characterizes the physical presence of hydrocarbon reserves.

2. The share of the use of non-renewable energy resources in the fuel and energy balance. This indicator is relevant for countries where the main share of energy resources is imported. In this case, the use of own renewable energy sources (hydroelectric power plants, tidal power plants, etc.) is a kind of "safety cushion". For Russia, which has large reserves of natural gas, oil and coal, the calculation of this indicator is not relevant.

3. The level of reserve capacity of power generating stations. The higher the standby power value, the more peak load can be met.

4. Energy efficiency of the country's economy. This indicator is determined by the level of fuel consumption, expressed in tons of standard fuel (toe) or tons of oil equivalent (toe), per 1,000 dollars (or rubles) of GDP. The higher the energy efficiency of the economy, the less its growth depends on the increase in consumed energy resources, and the higher the energy security of the region.

5. Efficiency of distribution of energy facilities and subjects of electricity consumption. The closer the producers of energy resources and energy consumers are to each other, the lower the cost of transporting fuel and the loss of electricity during its transmission.

6. Diversification of consumed energy resources. The more diversified the energy resources used in the energy sector, the lower the risk that a supply interruption or a significant reduction in the supply of one of the energy sources consumed will lead to an economic crisis.

In [296], it is proposed to calculate the PDFT (Probability of different fuel type) indicator, which reflects the probability that the next 1 W of power will be produced in the economy using a different type of fuel:

$$PDFT = 1 - \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (1.2)$$

where  $N$  is the number of types of energy resources used in the economy to generate electricity;

**S** is the share of the total capacity of power plants using the *i*-th type of energy resource in the total capacity of power plants used in the economy.

The higher the value of the PDFT indicator, the higher the diversification of electricity generation by fuel type.

7. Dependence of the region on imports of fuel and electricity. The dependence of the region on fuel and electricity imports can be characterized by the following indicator:

$$IW = \frac{gWh_{if} + gWh_i}{gWh_t} \quad (1.3)$$

where **gWh<sub>if</sub>** – the volume of electricity generated in the region through the use of imported fuel;

**gWh<sub>i</sub>** – the volume of electricity generated outside the region and transferred to the region;

**gWh<sub>t</sub>** – the total volume of generated and imported electricity in the region.

The higher the share of imported fuel used in power plants in the fuel and energy balance, the higher the dependence of the region on the economic and political state of the partner regions, and hence the lower the level of its energy security.

Another indicator for assessing a country's dependence on energy imports is the W&J Energy Index considered by L. Dunn [232] and calculated as follows:

$$I_t^1 = \left( \sum_i w_{it} \cdot X_{it} \right) \cdot 100 \quad (1.4)$$

$$X_{it} = \frac{C_{it} - I_{it}}{C_{it}} \quad (1.5)$$

where **w<sub>it</sub>** – the share of consumption of the *i*-th energy resource for the period *t* in the structure of consumption of the country's energy resources;

**X<sub>it</sub>** – the share of the consumed *i*-th energy resource produced in the country;

**C<sub>it</sub>** – the volume of consumption of the *i*-th energy resource for the period *t*;

**I<sub>it</sub>** – the volume of imports of the *i*-th energy resource for the period *t*.



The higher the value of this index, the lower the dependence of the region on the import of energy resources, and hence the higher the level of its energy security.

8. Diversification of energy suppliers. The greater the diversification of energy suppliers, the lower the risk that an interruption in supply or a significant reduction in supply from one of the energy suppliers will lead to serious consequences for the economy.

Two indicators are used to assess the degree of diversification of energy suppliers. The first indicator is the Herfindahl-Hirschman index:

$$HHI = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (1.6)$$

where  $p_i$  – share of energy resource supplies by the  $i$ -th supplier, in fractions of a unit.

The higher the value of the HHI index, the more monopolized the market. The HHI indicator, apart from being used to assess the diversification of suppliers, is also used to assess the diversification of the primary energy resources used.

The second indicator characterizing the diversification of suppliers is the Shannon index:

$$SI = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (1.7)$$

where  $p_i$  – share of energy resource supplies by the  $i$ -th supplier, in fractions of a unit.

The higher the value of the SI index, the higher the diversification of energy suppliers.

To simultaneously assess the degree of diversification of the used energy resources and import dependence, it is proposed in [205] to use the complex indicator NEID:

$$NEID = \frac{\sum_{i=1}^n m_i p_i \ln p_i}{\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i} \quad (1.8)$$

where  $m_i$  – share of the  $i$ -th energy carrier in net imports;

$p_i$  – share of the  $i$ -th energy carrier in the total volume of consumed energy resources.

The lower the value of the NEID index, the higher, other things being equal, the energy security of the region.

9. Prices for energy resources in the world markets. By itself, the price of an energy resource is not an indicator of energy security, but an additional analysis of the price dynamics of an energy resource allows an economic assessment of the possibility of using this energy resource for the country.

10. SD index (supply-demand index). This index is the ratio of supply of energy resources to demand for them in a given region. If the value of this index is higher than one, and this ratio has been maintained for a number of years, this means a high probability of an increase in prices for this energy resource in the future, which may negatively affect the level of energy security.

It should be noted that in studies based on a small number of considered energy security indicators, as a rule, complex indicators are used. An example is the comprehensive indicator of geopolitical energy security (GES) considered in [216], which makes it possible to take into account the risk of market concentration, political stability and market liquidity when assessing energy security. A comprehensive indicator of geopolitical energy security is as follows:

$$GES = \sum_j \left[ \left( \sum_i r_i \cdot (S_{ij})^2 \right) \cdot e^{(1/P_j)} \right] \cdot \frac{C_j}{TPES} \quad (1.9)$$

where TPES (total primary energy supply) – the total volume of supplied energy resources;

$C_j$  – volume of consumption of the  $j$ -th energy resource;

$\left[ \left( \sum_i r_i \cdot (S_{ij})^2 \right) \cdot e^{(1/P_j)} \right]$  – measure of risk of concentration of the  $j$ -th energy

resource;

$P_j$  – the total volume of supply on the free market of the  $j$ -th energy resource;

$r_i$  – political risk of the  $i$ -th country, ranging from 0 to 100;

$S_{ij}$  – the share of the  $i$ -th supplier-country of the  $j$ -th type of energy resource, determined on the basis of its net export potential.

Another complex indicator used to assess energy security is the REES (Risky External Energy Supply) risk indicator proposed by Le K. and E. Paltseva [283], which is based on the calculation of the share of fuel imports, the interchangeability of imports, the assessment of political risk, distances between supplying and consuming countries and dependence on imports.

$$REES_a^j = SF_a^j \cdot \sum_i \left( \frac{NPI_{ai}^j}{C_a^j} \right)^2 \cdot r_i \cdot d_{ia} \quad (1.10)$$

where  $SF_a^f$  – the share of the  $j$ -th energy resource in the energy balance of the  $a$ -th country;

$NPI_{ai}^j$  – net import of the  $j$ -th energy resource from the  $i$ -th country to the  $a$ -th country;

$r_i$  – political risk of  $i$ -th country;

$C_a^j$  – volume of consumption of the  $j$ -th energy resource;

$d_{ia}$  – distance between  $i$ -th and  $a$ -th countries.

For each type of energy resource, the REES score gives an estimate of how reliable the country's supply of that energy resource is. Since the value of the indicator decreases with a decrease in the number of suppliers and the distance of the counterparty countries and increases with the growth of political risks, higher REES values correspond to higher levels of risk in the supply of energy resources.

The shortcomings of most complex indicators are associated, firstly, with the complexity of their interpretation, and secondly, with their lack of objectivity. The complexity of interpretation arises when, on the basis of the above indicators, a comparison is made of the position of a number of states. In this case, without additional analysis, it is difficult to say for what reasons this or that country lags behind in terms of energy security, and due to changes in what factors an increase or decrease in its energy security level has occurred. The lack of objectivity of the indicators comes from the subjectivity of the expert assessment of some quantities

used in the calculations. In this regard, despite the existence of comprehensive indicators of the reliability of the supply of energy resources, in practice, when assessing the level of energy security of a country or region, relatively simple and easily interpreted indicators are more often used.

Since within the framework of the modern concept of energy security there are different approaches to its assessment, which differ significantly both in the number of indicators used and in the procedures for their processing and interpretation, an analysis of existing approaches to assessing energy security made it possible to identify the factors that have the greatest influence on the choice of indicators used:

- the period of time for which the assessment is carried out;
- whether the country has the status of a net importer or net exporter of energy resources;
- the researcher's priorities given to certain aspects of energy security;
- a set of short-term and strategic threats to energy security that are the most relevant for the country and/or region under consideration.

The first factor highlighted is the period of time for which the assessment is carried out: short-term or long-term. In the first case, more attention is paid to unexpected stressful situations that interrupt the process of extraction, transformation, transportation, distribution and consumption of energy resources at one stage or another. To analyze short-term energy security, indicators are used that characterize the technical and resource reserves of the system under consideration, the economic and social consequences of short-term interruptions in fuel supplies, the likelihood of certain adverse situations, etc.

When analyzing the reliability of the functioning of the energy system in the long term, the researcher takes into account strategic risks that develop gradually and lead to undesirable structural changes in the fuel and energy complex and/or the economy. In this case, the established trajectories of development of the national energy system, the national economy, the world economy and energy, the development of new technologies and the dynamics of their implementation, etc. become important for assessing the energy security of the country. Fundamental

economic and social phenomena are subject to analysis, which, on the one hand, affect on the development of the fuel and energy complex, and on the other hand, along the feedback chain, they themselves are determined by the dynamics of the development of the national energy sector. When assessing long-term energy security, the key indicators are energy intensity, the growth rate of the economy as a whole and its structural elements in particular, the dynamics of the development of the country's fuel and energy complex, the dynamics of changes in the structure of the fuel and energy complex, the rate of renewal of fixed capital, etc.

In table 1.3 shows some of the main indicators used in the assessment of energy security within the framework of the “4A” approach, grouped depending on the length of the period under consideration.

Table 1.3 – The main indicators used in the assessment of energy security in the framework of the “4A” approach, grouped depending on the duration of the period under consideration

	Short term	Long term
Availability	Hydrocarbon reserves, availability of alternative sources of fuel supply, reserves of generating capacities	Proved reserves of energy resources
Affordability	Price volatility	Dynamics of long-term price trends
Accessibility	Availability of production capacities in the fuel and energy complex, the degree of development of transport infrastructure	Dynamics of commissioning of new production capacities in the fuel and energy complex
Acceptability	Number of emissions from industrial accidents	Climate change and environmental pollution as a result of the functioning of the economy and industry

Source: compiled by the author

The second factor determining the choice of indicators used to analyze the level of energy security is the volume of energy resources in the country. The status of a net importer or net exporter of energy resources depends on the volume of reserves of energy resources in a country. This factor is one of the key ones when choosing and/or developing a new methodology for analyzing the level of energy security. The status of a net importer of energy resources greatly expands the list of current and

potential threats to the country's energy security and shifts the focus from the analysis of problems in the development of national energy and the economy to the analysis of the situation of supplier countries. Thus, the researcher focuses on the level of political stability, the level of energy development, the volume of hydrocarbon reserves, the safety of transport routes of supplier countries, etc.

Table 1.4 provides some of the main indicators used in the assessment of energy security within the framework of the “4A” approach, grouped depending on the status of a net importer or net exporter of energy resources.

Table 1.4 – The main indicators used in the assessment of energy security within the framework of the “4A” approach, grouped depending on the status of a net importer or net exporter of energy resources

	Net Importer	Net exporter
Availability	Potential volume of renewable energy sources, the share of imports of various energy resources in the structure of consumption of primary fuel and energy resources.	Oil reserves, coal reserves, natural gas reserves.
Affordability	Price volatility in global energy markets.	The cost of production and processing of energy resources.
Accessibility	The number of gas and oil pipelines through which FER is imported, the number of hydrocarbon suppliers, the political stability of counterparty countries.	Installed capacity of power plants, processing capacity of refineries, hydrocarbon production volumes, ratios of domestic demand and supply of energy resources.
Acceptability	Volume of emissions of pollutants in the country.	Indicators of environmental damage during hydrocarbon production, the volume of pollutant emissions in the country.

Source: compiled by the author

The third factor determining the choice of indicators used to analyze the level of energy security is the researcher's priorities given to certain aspects of energy security. The emergence of this factor is the result of a change in the paradigm of energy development that has taken place in the world over the past 10-15 years. As a result, the emphasis in determining energy security can be made on:

- reliability of supplies of energy resources (traditional approach);

- energy efficiency of the economy;
- combating energy poverty;
- environmental safety;
- military security;
- the price of energy resources and the possibility of their sharp growth.

Another factor directly affecting the choice of indicators used is the set of short-term and strategic threats to energy security that are most relevant for the country and/or region under consideration (Table 1.5). In other words, the exposure of different countries and regions of the world to various threats to energy security determines the differences in the systems of indicators used to assess their energy security.

Table 1.5 – Classification of energy security threats

	Short term	Long term
Technical and technological threats	Accidents	Physical and moral obsolescence of the main equipment, obsolescence of production technologies
Human factor	Terrorist attacks, political instability	Miscalculations in the energy and economic policy of the country
Natural hazards	Natural disasters	Resource exhaustion, environmental pollution
Economic threats	Short-term imbalances in supply and demand in commodity markets, leading to short-term price fluctuations that are difficult to predict	Systemic financial and economic crises, lack of investment in the fuel and energy complex, economic sanctions

Source: compiled by the author

It should be noted that the last two factors are strongly interrelated. The researcher's priorities are largely determined by the most pressing threats to the energy security of a country or region. Highlighting the most relevant threats, researchers, thereby, set their own priorities and from the whole variety of indicators choose those that fully describe and assess the likelihood of occurrence and the consequences of the implementation of a particular short-term or long-term threat. Despite the fact that, as a rule, when describing one or another approach to assessing energy security, these factors are not explicitly indicated, they play a decisive role in choosing the indicators and indicators used.

Many of the indicators discussed above formed the basis of the approaches and methods for assessing energy security existing in international practice. Let's consider some of them.

To analyze the short-term energy security of the member countries of the International Energy Agency, J. Jewell [270] proposes an assessment method called MOSES (Model of Short-term Energy Security). This approach, focused exclusively on energy importing countries, touches upon the problems of physical continuity of energy supply and completely misses such aspects as environmental safety, energy efficiency, structural changes in the economy and energy, that is, aspects of interest in the medium and long term.

In the MOSES model, all energy security indicators are proposed to be classified according to the criteria presented in Table. 1.6.

Table 1.6 – Classification of energy security indicators in MOSES

	Risk	Sustainability
External	risk indicators associated with a potential stop in the supply of imported energy resources	indicators characterizing the ability of energy systems and the economy to adapt to interruptions in the supply of imported energy resources through the replacement of suppliers
Internal	risk indicators characterizing the state of domestic infrastructure and production	indicators characterizing the ability of energy systems and the economy to adapt to interruptions in the supply of imported energy resources at the expense of domestic resources and reserves

Source: [270]

The assessment of the energy security of the country consists in the analysis of the values of 35 indicators determined for the main types of energy resources supplied to the country under consideration. For example, for oil, such indicators are import dependence, political stability of the supplier, the number of oil export routes (the number of ports and oil pipelines), the diversity of suppliers, the share of offshore oil production, the volatility of domestic production, and the average level of oil reserves in the country. The values of the indicators are determined by an expert or statistical method. Then the values of the indicators allocated for each energy



resource are ranked according to the level of risk: low risk of energy security; medium risk; high risk (Table 1.7). At the next stage, the level of reliability of supplies for this energy resource to the country is determined and a general conclusion is formulated about the level of energy security of the country.

Table 1.7 – Ranking the values of indicators characterizing oil supplies to the country

	Indicator	Risk			
		low	medium	high	
External risk	Import dependency	$\leq 15\%$	40%-65%	$\geq 80\%$	
	Supplier political stability	$< 2,5\%$	$\geq 2,9\%$		
Internal risk	Mining volatility	$< 20\%$	$> 20\%$		
	Share of offshore production	$< 15\%$	$> 90\%$		
External	Supplier diversity	$< 0,3\%$	0,3-0,8	$> 0,8\%$	
	Import infrastructure	Ports	$\geq 5$	2	1
		Pipelines	$\geq 9$	3-4	2
Flexibility	Inventory level	$\geq 55$	20-50	$\geq 15$	

Source: [270]

The described approach to assessing energy security has a very limited scope and does not affect such important aspects of the functioning of energy systems as the structure of generating capacities, the availability of reserves of generating capacities, the dynamics of changes taking place in the country's fuel and energy complex, etc. This method is only valuable for solving a limited range of practical tasks, which include, for example, assessing the level of short-term energy security of countries that import energy resources.

Another approach to assessing energy security is offered by the World Energy Council (WEC), established in 1923 and a UN accredited body dealing with global energy issues. For a number of years, the WEC has been giving annual assessments of the level of energy security in 125 countries of the world.

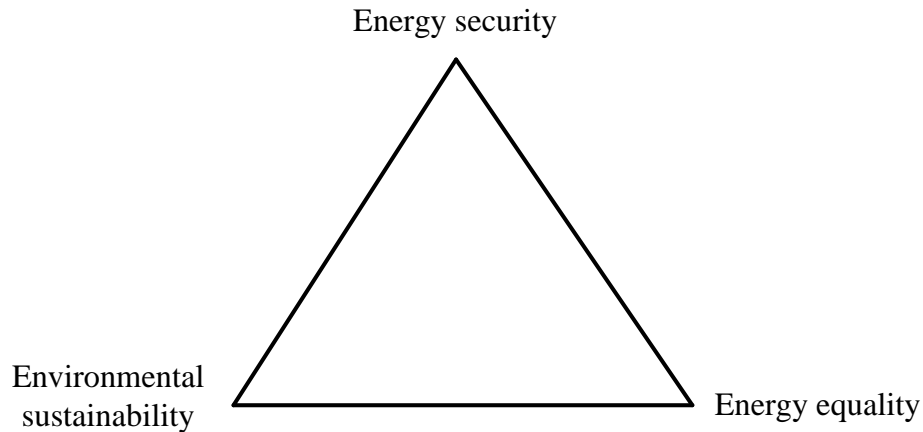


Figure 1.3 – "Energy Trilemma" of the World Energy Council

Source: [357]

The energy security assessment is based on the idea of the “energy trilemma” (Figure 1.3), which includes the following elements:

- energy security - effective management of the supply of primary energy resources from internal and external sources, the reliability of the energy infrastructure and the availability of energy suppliers to meet current and future needs;
- energy equity - physical and price availability of energy for the population;
- environment sustainability – renewable energy sources, energy efficiency, environmentally friendly energy technologies.

To evaluate the selected elements, the values of indicators of the state of the national energy system are calculated, which are then taken into account when calculating the final index (Energy Trilemma Index). The scheme for calculating the index is shown in fig. 1.4. The indicators and their weights used in the calculation are given in Table. 1.8.

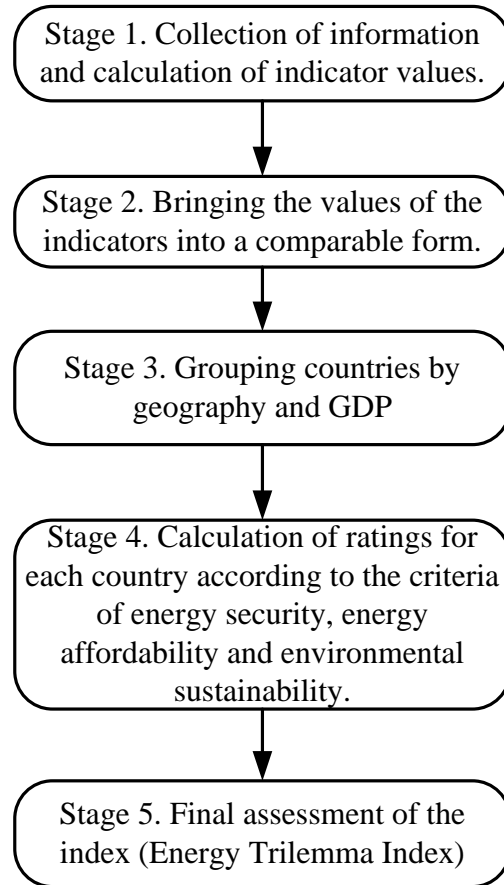


Figure 1.4 – Energy Trilemma Index calculation scheme

Source: [357]

Table 1.8 – Indicators and their weights used in the calculation of the Energy Trilemma Index

Indicator category	Indicators	%
<b>Energy security (30%)</b>		
Security of supply and energy delivery (15%)	Variety of sources (suppliers) of primary energy	5,0%
	Energy intensity of GDP	5,0%
	Import dependency	5,0%
Resilience (15%)	Energy reserves	5,0%
	Ready to learn	5,0%
	Variety of electricity sources	5,0%
<b>Energy equity (30%)</b>		
Access (10%)	Availability of electricity	5,0%
	Availability of clean cooking	5,0%
Quality of supply (10%)	Power quality	5,0%
	The quality of the supply of the population	5,0%
Affordability and competitiveness (10%)	Electricity prices	3,3%
	Motor fuel prices	3,3%
	Gas prices	3,3%

<b>Environment sustainability (30%)</b>		
Energy resource productivity (10%)	Energy Efficiency	5,0%
	Power Generation Efficiency	5,0%
GHG emissions (10%)	CO2 emissions trend	5,0%
	Changes in forest area	5,0%
CO <sub>2</sub> emissions (10%)	CO <sub>2</sub> emission	3,3%
	CO <sub>2</sub> emissions per person	3,3%
	CO <sub>2</sub> emissions from power plants	3,3%
<b>Country context (10%)</b>		
Coherent and predictable policy framework (2%)	Government efficiency	0,5%
	Political stability	0,5%
	Level of corruption	0,5%
	The state of macroeconomics	0,5%
Stable regularity environment (2%)	Execution of laws	0,7%
	Quality control	0,7%
	The quality of political leadership	0,7%
Initiatives that enable RD&D and innovation (2%)	Opportunities for innovation	0,5%
	Number of patents	0,5%
	Intellectual Property Protection	0,5%
	Implementation options	0,5%
Investability (2%)	Foreign investment	1,0%
	Ease of business organization	1,0%
Air pollution, land and water impact (2%)	Water pollution and waste management	1,0%
	Fight against air pollution	1,0%

Source: [357]

The World Economic Forum (WEF) is also involved in assessing the energy security of countries. Since 2013, this organization has been publishing The Global Energy Architecture Performance Index Report, which provides an assessment of the energy security of 127 countries of the world. In the methodology used for the analysis, the values of 18 indicators are determined, which are assigned the appropriate weights (Table 1.9). The defined indicators characterize three elements of energy security: economic growth; environmental sustainability; energy availability. Then, on the basis of these indicators, the final complex indicator of energy security "Global Energy Architecture Performance Index" (GEAPI) is calculated.

Table 1.9 – Indicators used by the World Economic Forum to analyze the level of energy security

Measure	Indicator name	Indicator
Economic growth and development (0,33)		
Intensity	Energy intensity, GDP per unit of energy use	0,25
Supports/detracts from growth	Cost of energy imports (% GDP)	0,125
	Value of energy exports (% GDP)	0,125
Affordability	Degree of distortion of gasoline prices in the world market (indices)	0,15
	Degree of distortion of prices for diesel fuel in the world market (indices)	0,15
	Electricity prices for industry	0,25
Environmental sustainability (0,33)		
Environmental impact	Share of alternative and nuclear energy	0,2
	CO2 emissions from power plants	0,2
	The volume of methane emissions in the fuel and energy complex	0,1
	Specific fuel consumption in cars	0,2
	Nitrogen oxide emissions	0,1
	Index PM 2.5	0,1
Energy access and security (0,33)		
Power supply level	Electrification rate (% of population)	0,2
	Power supply quality	0,2
	Percentage of the population using solid fuels for cooking	0,2
Supply diversification	Diversification of primary energy supply sources	0,1 (0,2)
Self-sufficiency	The level of dependence on imports of energy resources	0,2
	Import diversification	0,1

Source: [244]

Analysis of the US energy security level is carried out by the Global Energy Institute [264]. The overall assessment of the level of energy security is based on the calculation of the Index of US Energy Security Risk (USES R) complex indicator, based on the calculation of 37 individual indices belonging to 9 groups:

1. World fuel market. This group includes indices that characterize the reliability of supplies and reserves of oil, natural gas and coal: the security of world oil reserves; security of world oil production; the security of the world's natural gas

reserves; safety of natural gas production in the world; security of world coal reserves; security of global coal production.

2. Import of energy resources. This group includes indices that characterize the sensitivity of the national economy to unreliable supplies of energy resources: the security of imported oil supplies to the United States; security of US gas imports; oil and natural gas import costs; spending on oil and natural gas imports as a percentage of GDP.

3. The cost of energy resources. This group includes indices that characterize the volume of energy costs in the economy, as well as the sensitivity of the population to price shocks: expenditures on energy resources as a percentage of GDP; average household expenditures on energy resources; retail price of electricity; oil price.

4. Prices and volatility of the energy resources market. This group includes indices that characterize the sensitivity of the national economy to changes in prices for energy resources: volatility in oil prices; volatility of energy costs; level of use of oil refineries in the world; level of oil reserves.

5. Energy intensity. This group includes indices characterizing the energy efficiency of the national economy: energy consumption per capita; energy intensity; volume of oil consumed; household energy efficiency; commercial energy efficiency; industrial energy efficiency.

6. Power industry. This group includes indices that characterize the reliability of power supply: the level of diversification of types of generating capacities; reserves of generating capacities; length of power lines.

7. Transport sector. This group includes indices that characterize the efficiency of fuel consumption in the transport sector: average fuel consumption; miles traveled per \$1,000 GDP; the use of fuels in transport, other than those derived from oil.

8. Environment. This group includes indices that characterize the country's obligations to limit pollutant emissions: CO<sub>2</sub> emissions in the fuel and energy complex; CO<sub>2</sub> emissions per inhabitant; efficiency of consumption of energy

resources in terms of CO<sub>2</sub> emissions; share of electricity generated without CO<sub>2</sub> emissions.

9. R&D. R&D expenses; federal government R&D spending; the number of people with academic degrees.

It should be noted that the current values of all indicators in the approach are determined by comparing them with the state of the US energy industry in 1980. That is, 1980 is the base year in which the values of all indicators correspond to 100.

An analysis of the scientific and practical literature on the issues of assessing energy security abroad showed that the main elements of analyzing the level of energy security are:

- assessment of the reliability of the supply of energy resources to the region, with an emphasis on the degree of dependence of the energy sector of the region on imported supplies of energy resources;
- assessment of economic efficiency and environmental acceptability of the functioning of both national energy systems and individual energy technologies.

An increasing role in assessing the level of energy security in foreign methods is given to the diversification criterion: diversification of the types of energy resources used, diversification of the types of generating capacities, diversification of suppliers, diversification of transport routes, etc. attention. The process of energy production and consumption consists of the following stages: extraction and transportation of primary energy resources, transformation, transmission, distribution, consumption. An analysis of international methods for assessing the level of energy security showed that they focus on the stage of extraction and transportation of energy resources, as well as on the stage of energy consumption, which is considered in the context of the efficiency of the final use of energy services. The problems of converting energy resources into electricity and heat, as well as the transmission and distribution of the generated energy, are thus secondary. For Russia, which has one of the largest reserves of hydrocarbons and at the same time has large territories with an uneven distribution of the population, on the contrary, the most relevant stages in the

process of production and consumption of energy in assessing energy security are the stages of transformation and transportation of energy resources.

Another feature of foreign methods for assessing energy security is the lack of a distinction between short-term and long-term energy security. The only methodology that assesses the security of energy supply in the short term is the MOSES model, which is explicitly focused on assessing short-term, unexpected and physical interruptions in fuel supply threats. Most other methods either do not separate short-term and long-term threats in the assessment methods at all, or separate them, but without any adjustments in the assessment methods used.

Russia has large reserves of energy resources and a significant production potential of the fuel and energy complex, which makes it possible to extract primary energy resources not only for domestic consumption, but also for export. According to all the main indicators of energy security accepted in the world practice, Russia has a high level of energy security. At the same time, studies show that the domestic fuel and energy complex has a number of features and problems (large unevenly populated territory; obsolescence of fixed production assets; technological backwardness of Russian fuel and energy industries from world competitors, etc.) [138, 161, 162, 170] which, by reducing the ability of the Russian energy system to resist various kinds of stressful situations, pose a threat to the long-term energy security of the country.

Much work on the development of the theory of assessing the energy security of the country and regions of Russia was carried out at the Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS by such scientists as S. M. Senderov, L. V. Massel, V. I. Rabchuk, N. I. Pyatkova, N. I. Voropai and others [120, 151-154, 163, 165, 166]. The main result of the research was the development of a method for indicative analysis of the level of energy security of regions, which includes the stage of comparing the values of indicators with their threshold values, which allows you to compare the levels of energy security in different regions and study the dynamics of their change.

The assessment of the state of the energy security of the region is based on the calculation of a system of indicators grouped into three blocks (Table 1.10).



Table 1.10 – Composition of the most important indicators of the energy security of the region

Block	Indicators
Block of production and resource provision of the fuel and energy supply system of the region	<p>The ratio of the total available capacity of power plants in the region to the maximum electrical load of consumers in its territory.</p> <p>The ratio of the sum of the available capacity of power plants and the throughput capacity of the intersystem connections of the region with neighboring ones to the maximum electrical load of consumers in the territory.</p> <p>The ability to meet the needs of consumers in boiler and furnace fuel from the region's own sources.</p>
Block of reliability of fuel and energy supply of the region	<p>The share of the dominant resource in the total consumption of boiler and furnace fuel in the region.</p> <p>The share of the largest power plant in the installed electric capacity of the region.</p> <p>The level of potential fuel demand security in the conditions of a sharp cooling (10% increase in consumption) in the region.</p>
Block of the state of the main production assets of the energy sector in the region	<p>The degree of depreciation of the BPF of the energy sector of the region.</p> <p>The ratio of the average annual commissioning of installed capacity and reconstruction of power plants in the region over the past 5 years to the installed capacity of the region.</p>

Source: [153]

Threshold values for the indicator "The ratio of the total available capacity of power plants in the region to the maximum electrical load of consumers in its territory" (Table 1.11) are ranked for the selected four groups of regions:

- the total capacity of possible electricity flows with neighboring regions is at least 50% of the electricity capacity installed in the region;
- the total capacity of possible electricity flows with neighboring regions from 20% to 30% of the electricity capacity installed in the region;
- the total capacity of possible electricity flows with neighboring regions is not more than 20% of the electricity capacity installed in the region;
- isolated regions.

The grouping of regions to determine the threshold values of the indicator "The ratio of the sum of the available capacity of power plants and the throughput capacity

of intersystem connections of the region with neighboring ones to the maximum electrical load of consumers in the territory" is carried out as follows:

- regions with a developed transport infrastructure connecting it with regions with large reserves of coal and gas;
- regions with a developed transport infrastructure connecting it with regions with large coal reserves;
- regions with poorly developed transport infrastructure.
- Grouping of regions to determine the threshold values of the indicator "The share of the dominant resource in the total consumption of boiler and furnace fuel in the region" is carried out as follows:
  - regions with self-sufficiency in boiler and furnace fuel;
  - regions with insignificant reserves of energy resources.

The grouping of regions to determine the threshold values for the indicator "Share of the largest power plant in the installed electric capacity of the region" is the same as for the indicator "Ratio of the total available capacity of power plants in the region to the maximum electrical load of consumers in its territory".

Grouping of regions to determine the threshold values of the indicator "The level of potential supply of demand for fuel in conditions of a sharp cooling (10% increase in consumption) in the region" is carried out as follows:

- regions with a mild climate;
- temperate regions;
- cold climate regions.

Table 1.11 Threshold values for a number of energy security indicators

Region group	State		
	Acceptable	Pre-crisis	Crisis
	The ratio of the total available capacity of power plants in the region to the maximum electrical load of consumers in its territory		
1	>0,5	0,3-0,5	<0,3
2	>0,7	0,5-0,7	<0,5
3	>1	0,8-1	<0,8
4	>1.2	1,1-1,2	<1,1
	The ratio of the sum of the available capacity of power plants and the throughput capacity of the region's intersystem connections with neighboring ones to the maximum electrical load of consumers in the territory		

1	>40%	20%-40%	<20%
2	>60%	40%-60%	<40%
3	100	80%-100%	<80%
The share of the dominant resource in the total consumption of boiler and furnace fuel in the region			
1	<90%	>90%	-
2	<40%	40%-70%	>70%
Share of the largest power plant in the installed electric capacity of the region			
1	<50%	50%-70%	>70%
2	<40%	40%-50%	>50%
3	<30%	30%-40%	>40%
The level of potential supply of demand for fuel in the conditions of a sharp cooling (10% increase in consumption) in the region			
1	>100%	80%-100%	<80%
2	>100%	90%-100%	<90%
3	>100%	100%	<100%

Source: [153]

The general scheme for setting threshold values is as follows: the lower the possibility of electricity flow from neighboring regions, the higher, other things being equal, the installed capacity in the region under consideration should be to cover possible peak loads. In table 1.12, the threshold values of the indicators are given without grouping the regions under consideration.

Table 1.12 - Threshold values for a number of energy security indicators without grouping the regions under consideration

Indicator	State		
	Acceptable	Pre-crisis	Crisis
The ratio of the sum of the available capacity of power plants and the throughput capacity of the region's intersystem connections with neighboring ones to the maximum electrical load of consumers in the territory	>1,5	1,2	<1,2
The degree of depreciation of the BPF of the energy sector of the region	<40%	40%-60%	>60%
The ratio of the average annual commissioning of installed capacity and reconstruction of power plants in the region over the past 5 years to the installed capacity of the region	>2	2-3	<1

Source: [153]

The ranking of the values of the indicators used is proposed to be carried out as follows:

$$f(S_i) = \begin{cases} H, S_i < S_i^{PK} \\ PK, S_i^{PK} \leq S_i < S_i^K \\ K, S_i \geq S_i^K \end{cases} \quad i = 1, n \quad (1.11)$$

where  $n$  is the number of considered indicators;

$S_i$  is the actual (expected) value of the  $i$ -th indicator;

$S_i^{PK}, S_i^K$  – values of the pre-crisis and crisis threshold values of the  $i$ -th indicator;

$H, PK, K$  – indicator values corresponding to the normal, pre-crisis and crisis state, respectively.

To obtain an integral assessment of the state of energy security, it is necessary to determine the specific weights of the calculated indicators:

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n v_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij}} \quad (1.12)$$

where  $V_i$  is the share of the  $i$ -th indicator in the system of assessed indicators;

$v_{ij}$  is the conditional significance of the  $i$ -th indicator in comparison with the  $j$ -th indicator.

The value of conditional significance ( $v_{ij}$ ) is determined by an expert method. In table 1.13 shows a matrix of comparative characteristics of the conditional significance of energy security indicators.

Table 1.13 – Matrix of comparative characteristics of the conditional significance of energy security indicators

1	$v_{12}$	$v_{13}$	...	$v_{1n}$
$v_{21}$	1	$v_{23}$	...	$v_{2n}$
$v_{31}$	$v_{32}$	1	...	$v_{3n}$
...	...	...	1	...
$v_{n1}$	$v_{n2}$	$v_{n3}$	...	1

Source: [153]

For the integral assessment of energy security, the following algorithm is used:

$$Q_u = \begin{cases} H, \sum_{i=1}^n V_i^H \geq \delta_H \\ \text{ПК}, \sum_{i=1}^n V_i^K < \delta_K \text{ u } \sum_{i=1}^n V_i^H < \delta_H, \quad i = 1, n \\ K, \sum_{i=1}^n V_i^K \geq \delta_K \end{cases} \quad (1.13)$$

where  $Q_u$  – integral assessment of the qualitative state of energy security according to the indicative assessment;

$V_i^H, V_i^K$  – the share of the  $i$ -th indicator, which is in the area of normal and crisis values, respectively;

$\delta_H, \delta_K$  – coefficients characterizing the level of achievement of a normal or crisis state, respectively.

To assess the energy security of Russia at the federal level, the following system of indicators is used:

1. The ratio of the annual increase in the balance reserves of primary fuel and energy resources to the volume of their production. This group includes four indicators calculated for oil, gas, coal and uranium, with the following threshold values: for oil and gas: pre-crisis - 1.0, crisis - 0.95; for coal: pre-crisis - 0.75, crisis - 0.5; for uranium: pre-crisis - 1.2, crisis - 1.1.

2. The share of natural gas in the structure of the balance of primary fuel and energy resources. Threshold values of the indicator: pre-crisis - 0.50, crisis - 0.55.

3. Dynamics of the price level within the country for oil, gas, coal and uranium. For oil, coal and uranium, the threshold values are: pre-crisis - 1.01 + inflation index; crisis - 1.03 + inflation index. For gas, the threshold values are: pre-crisis - 1.05 + inflation index; crisis - 1.1 + inflation index.

4. Implementation of investment programs by fuel and energy industries. The group includes five indicators (with threshold values of 0.9 and 0.7) determined in the field of production and transportation of oil and gas condensate, in oil refining, in the gas industry, in the coal industry, and in the electric power industry.

5. Relative change in the specific energy intensity of GDP (pre-crisis - 0.97; crisis - 0.98).

6. Stability of providing consumers with various types of fuel and energy resources. This group includes 8 indicators, 5 of which are indicators of the total shortfall in the supply of gas, coal, fuel oil, light oil products, electricity, and 3 are indicators characterizing the degree of satisfaction of demand for boiler and furnace fuel, heat energy and electricity in conditions of a sharp cold snap.

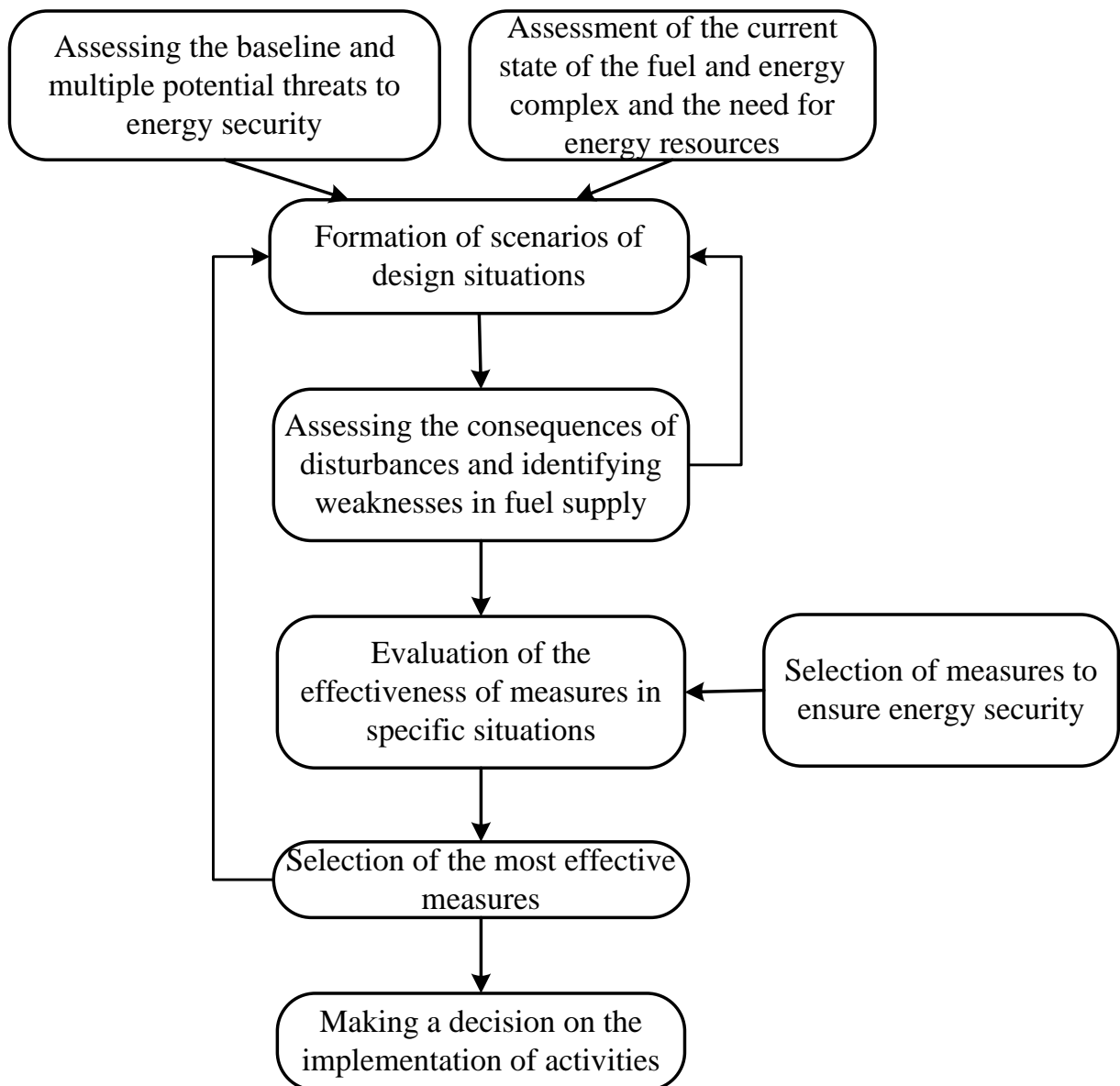


Figure 1.5 – Algorithm for studying the energy security of the country

Source: [153]

The use of the above method is one of the stages in the process of analyzing the current state of the fuel and energy industries and developing measures for the development of the national energy sector in order to increase the level of the country's energy security, which is implemented using the complex of optimization and simulation models of energy industries developed at the ISEM SB RAS. On fig. 1.5 reflects the general algorithm for studying the energy security of the country. It can be seen that an indicative assessment of the energy security of the country and the region is the initial stage of strategic planning for the development of the fuel and energy complex of the country and regions.

The used methodology for assessing energy security and the applied tools for developing strategic measures aimed at increasing the reliability of the functioning of the national energy sector overlook such aspects of ensuring energy security as combating energy poverty, developing sustainable energy, developing adaptive properties of energy systems, as well as developing financial and economic mechanisms for ensuring the growth of the country's energy security. However, in modern conditions, the level of development of the national economy and energy economy plays an important role in ensuring energy security. Therefore, along with the generally recognized indicators of energy security, indicators should be developed that characterize the financial and economic aspects of the functioning of the energy sector, which directly or indirectly affect the energy security of the country in the long and medium term.

### **1.3. Current trends in the energy security insurance methodology development**

Despite a large number of studies in the field of assessing the level of energy security and developing measures to ensure it, fundamental processes in the world energy and economy (including the development of sustainable energy, international economic integration, increased geopolitical tensions, digitalization of the economy and energy, the development of renewable energy sources, the growth of environmental requirements, the development of new technologies), combined with the growing uncertainty and risks of the functioning of the domestic economy and the

energy sector, as well as the obsolescence and physical obsolescence of fixed production assets in the Russian fuel and energy complex, necessitate further development of the methodology for solving strategic problems of long-term energy security in Russia. The fundamental nature of these processes determines the need for a shift in the process of managing energy systems in order to ensure long-term energy security from the current technical state of the systems, the physical reliability of production and transportation of energy resources to the construction of adaptive and sustainable energy systems that quickly adapt to changes in their operating conditions. Thus, to ensure long-term energy security, the efforts of researchers should be directed not only to the analysis of the current state of the energy system and the existing relationships between the economy and energy, but also to ensure the ability of the energy system to adequately respond to changes in the economy and energy, including changing its own structure and establishing new relationships between its elements [295].

The solution of urgent problems of ensuring the energy security of Russia can be carried out through the development of the theory of decision-making in the energy sector in the conditions of high uncertainty of the initial data, the growth of risks, as well as the increasing role of investments in ensuring the functioning and development of energy systems. In the context of the liberalization of world energy markets and the primacy of private investment in the modern economy, the possibility of solving long-term problems of ensuring energy security is determined not only by the development and implementation of science-based and optimized options for the strategic development of the fuel and energy complex, but also by the development of financial and economic mechanisms for the efficient and sustainable development of energy systems capable of quickly adapting both to short-term stressful situations and to long-term changes in the external environment.

The trends described above are interconnected in the process of realizing one of the most important strategic threats to Russia's long-term energy security - the lack of investment in the economy and energy. The long-term self-reinforcing process of the deployment of the strategic threat of an investment deficit, due to the mutual



influence of the fundamental processes taking place in the global energy and economy, and the growth of uncertainty and risks in the functioning of the domestic economy and energy, is shown in Figure 1.6.

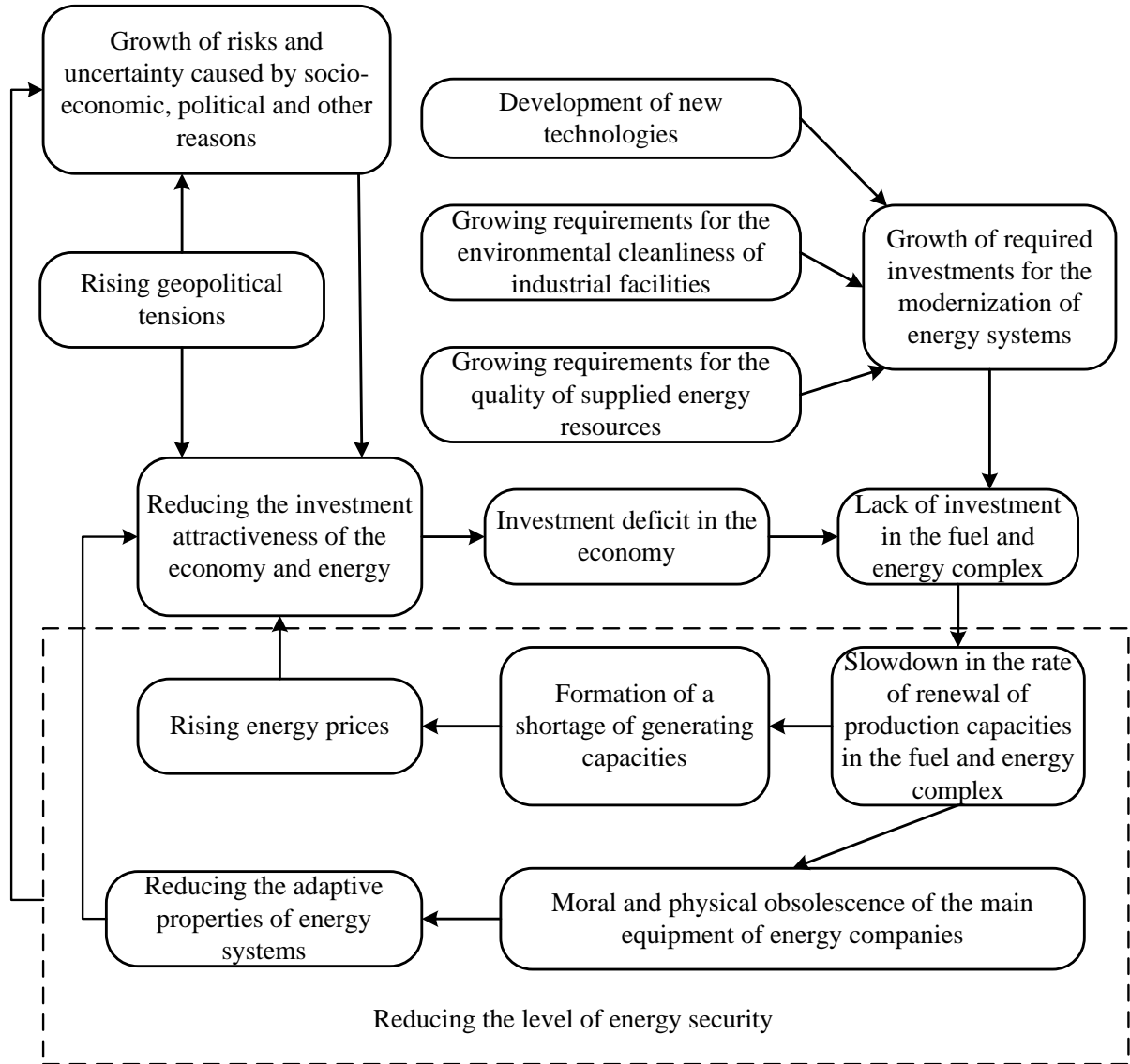


Figure 1.6 – Long-term self-reinforcing process of deployment of the strategic threat of investment deficit in the economy and energy

Source: compiled by the author

Figure 1.6 shows that the low level of investment attractiveness of the economy and the energy sector, due to the growth of uncertainty and the realization of socio-economic, political and other risks, combined with the growth of the required investments necessary for the modernization of the fuel and energy complex towards

the development of sustainable energy, lead to a shortage of investments in economy and energy, moral and physical obsolescence of the main production capacities of the fuel and energy complex, which, in turn, along the chain of economic relations leads to a slowdown in economic growth and a further decrease in the investment attractiveness of the country's economy and energy.

One of the main reasons for the lack of investment in the economy and energy is the low investment attractiveness of the Russian economy in general and the fuel and energy complex in particular (due to the peculiarities of the functioning of the Russian fuel and energy complex, its investment attractiveness directly depends on the investment attractiveness of the country's economy).

The strategic threat of a shortage of investment in the energy sector, the implementation of which is the result of the low investment attractiveness of the Russian economy and high risks, has already led to the problem of moral and physical obsolescence of the main production assets of the fuel and energy complex. Thus, over the past 30 years, there has been a significant increase in the average age of power plants (Table 1.14). About 90% of the capacities of existing power plants, 70% of main oil pipelines, 70% of boiler houses, 66% of heating networks, 46% of gas pumping units have been in operation for more than 20 years [135], and the number of new capacities commissioned is insufficient: the renewal factor in recent years has been 2% (4% for oil production).

Table 1.14 - Average service life of power plants in Russia, years

Type of power plants	1990	2000	2010	2015
Hydroelectric power station	21	25	32	33
Nuclear plant	9	14	17	18
Steam turbine power plants	20	22	28	30
Gas turbine power plants	8	10	9	11
Combined-cycle power plants	-	-	4	7

Source: [135]

A high degree of depreciation of fixed assets creates the risk of major accidents accompanied by environmental pollution and power supply failures, and also significantly complicates the process of improving the energy efficiency of the

Russian economy. In addition, the lag in the development of production capacities of the fuel and energy complex (in particular, electricity generation) from the pace of economic development, which can lead to higher energy prices in the domestic market and a slowdown in economic growth in the future, significantly increases the risk of a decrease in the country's long-term energy security.

Since investments are an integral part of ensuring the long-term energy security of the country, the investment attractiveness of the fuel and energy complex can serve as one of the indicators of the level of energy security. However, despite a fairly large list of indicators characterizing the level of the country's energy security, at present it does not reflect such an aspect as the investment attractiveness of investments in the fuel and energy complex.

The problem of creating a favorable investment climate and providing the fuel and energy complex with investment resources is closely related to the problem of increasing uncertainty and risks in the functioning of energy systems. In modern conditions, the following can be identified as the main reasons for the growth of uncertainty in the world economy and energy:

1. Rising geopolitical tensions.
2. Political instability in the countries of the Middle East, which are major oil exporters.
3. A high rate of scientific and technological progress leading to increased uncertainty about the technologies that will be used in the future.
4. Strong integration in the world arena of real and financial investments, leading to the fact that the high uncertainty and volatility inherent in financial markets “spreads” to the real sector of the economy, resulting in significant changes in the nature of the management of production units.
5. The growing importance of the environmental and economic consequences of interruptions in the supply of energy resources, due to globalization and the complication of socio-economic and technical relationships between the structural elements of the economy and energy.

Increasing uncertainty and risks in the functioning of the global economy and the energy sector has an impact on the formation of a long-term trajectory for the development of energy systems (Fig. 1.7).

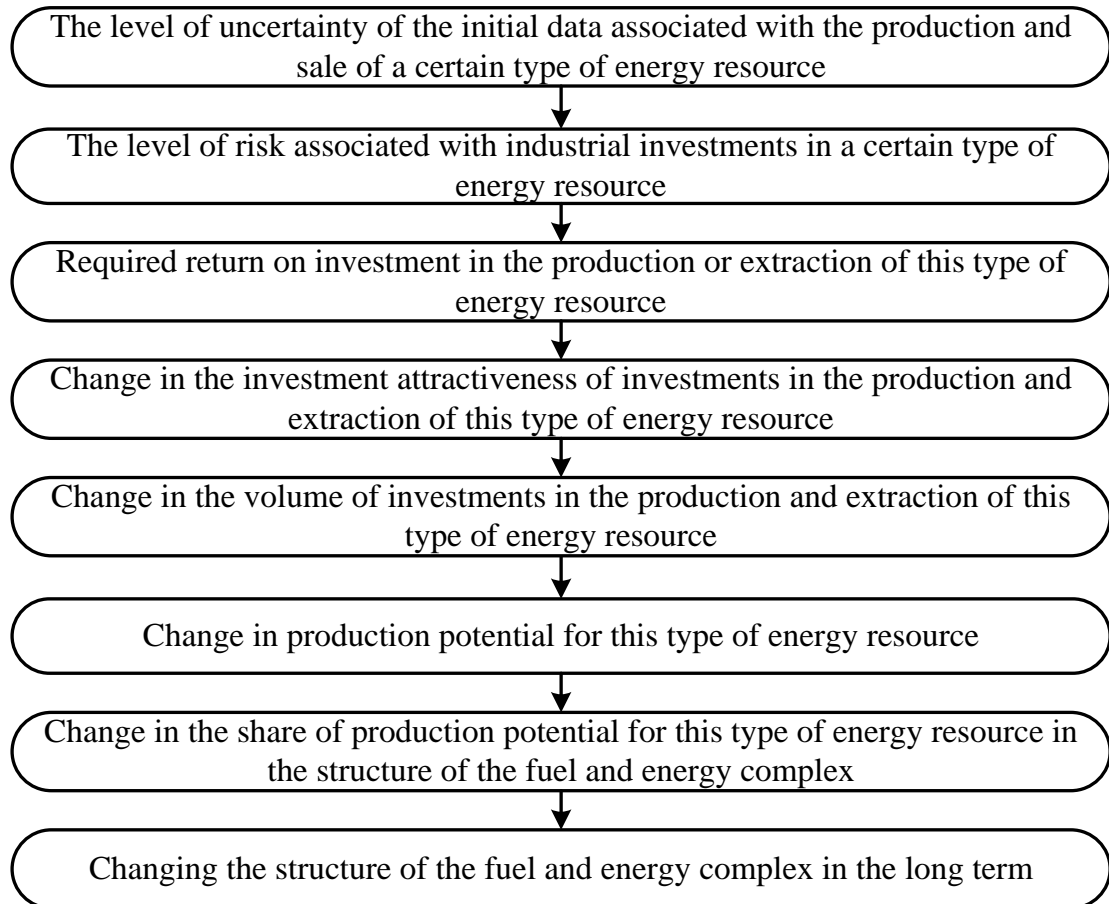


Figure 1.7 – Mechanism of the influence of the uncertainty of the initial data on the development of the fuel and energy complex

Source: compiled by the author

The uncertainty of the initial data related to the operating conditions of modern energy systems has a different effect on energy systems of different levels, differing in the degree of technical complexity and geographical location [293]. In Figure 1.8, fuel and energy levels are correlated with economic parameters, the uncertainty of which affects them to a greater extent [93].

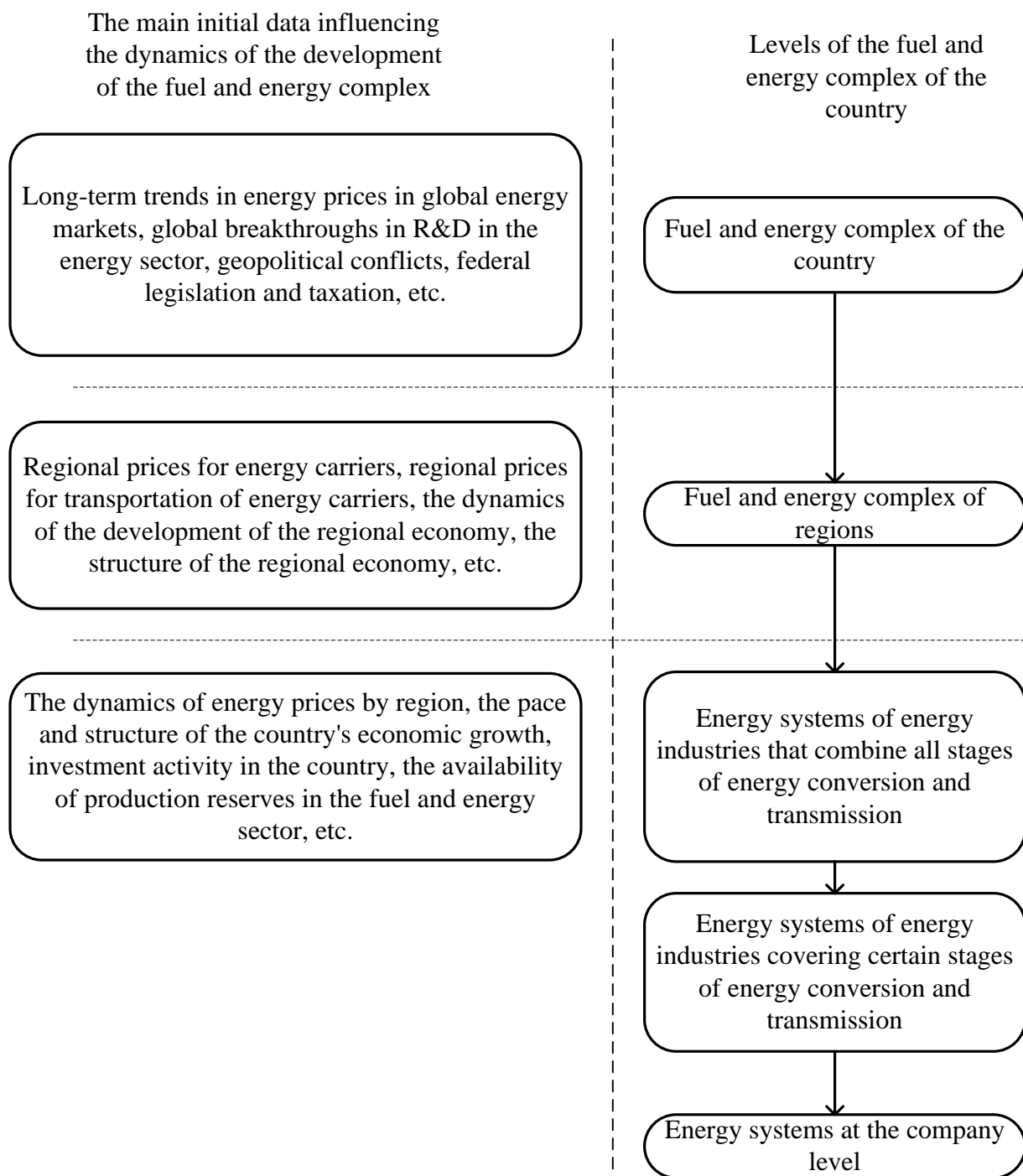


Figure 1.8 – Levels of fuel and energy complex and economic parameters, the uncertainty of which affects them to a greater extent

Source: compiled by the author

The main factors influencing the trajectory of the development of the fuel and energy complex are the demand and prices for energy carriers, since in this case the main principle of economic development works: an increase in demand and / or price

for a product stimulates, all other things being equal, an increase in the supply of this product. Accordingly, the production or production of an energy carrier, for which demand and/or price is growing, increases, and the production of energy carriers, for which demand and/or price falls, decreases. As a result, the production structure of the fuel and energy complex is changing under the influence of market factors.

The uncertainty of the initial data does not have a primary impact on the trajectory of the development of the fuel and energy complex, yielding in importance to such factors as the dynamics of prices and demand for energy in the economy, the growth rates of the domestic and world economies. However, during periods of economic instability and high uncertainty of the main macroeconomic indicators, the factor of uncertainty in the initial data and increasing risks becomes more important and should be taken into account when developing measures aimed at increasing the level of energy security [94].

Without taking into account the uncertainty of the initial data, it is difficult to obtain reliable results regarding the development of both the fuel and energy complex and the country's economy as a whole. The place of assessing the level of uncertainty and risks in the process of analyzing the dynamics of the development of the fuel and energy complex is shown in Figure 1.9.

The consequences of the negative impact of uncertainty and risks in the functioning of energy systems that threaten the reliability of energy supply in conditions of constant fluctuations and long-term adverse changes in the external environment can be minimized using such a property of developing and open systems as adaptability, which in the general case is the ability of systems to change, adapting to adverse changes in the external environment, to maintain its integrity and efficiency of functioning.

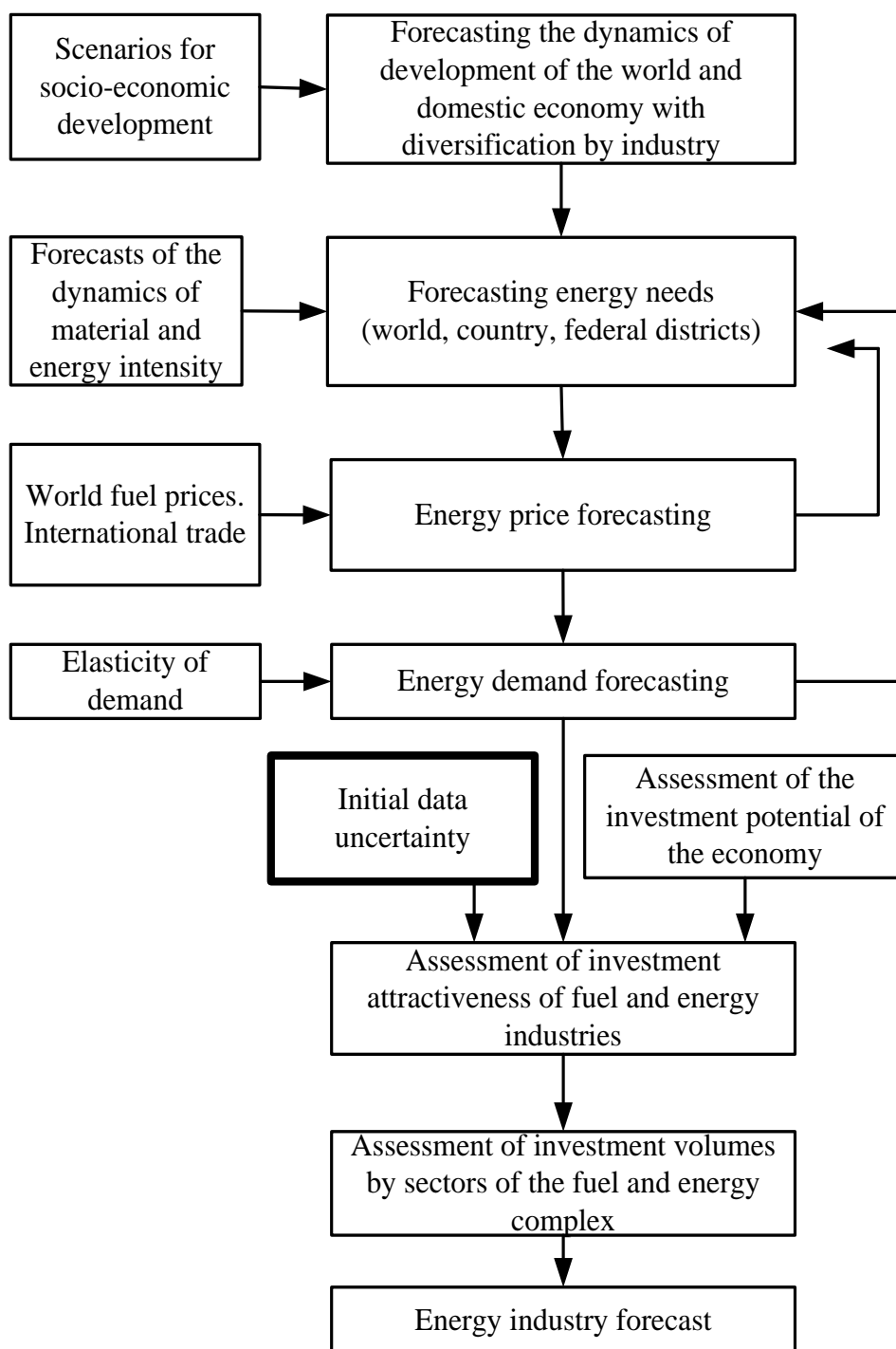


Figure 1.9 – Place of assessment and accounting for the uncertainty of the initial data when forecasting the dynamics of the development of the fuel and energy complex

Source: compiled by the author

Further development of the methodology for ensuring energy security should be carried out taking into account the relationship between the levels of adaptability of energy systems and the investment attractiveness of the energy industry and the

economy: the investment attractiveness of the energy sector creates conditions for attracting financing for adaptation measures, while a high level of adaptability of the national energy system reduces investment risks, thereby increasing investment attractiveness of the economy and energy. The assessment of the investment attractiveness of the energy sector is largely based on the assessment of the conditions for the implementation of large-scale investment projects in the fuel and energy complex, which will require the development of methods for assessing capital investments and risks in the energy sector in accordance with the tasks of ensuring the country's energy security.

An important step in the process of developing a strategic scenario for the development of the fuel and energy complex, aimed at improving energy security, should be the development of measures to reduce the impact of the implementation of threats to energy security on the quality of life of the population. The ultimate goal of solving the problems of ensuring energy security is to improve the quality of life of the population. However, despite the large number of works devoted to the relationship between the level of the quality of life of the population and the volume of consumption of energy resources, the mechanism of the impact of the implementation of threats to energy security on the level of well-being and quality of life of the population, the problems of assessing this impact and developing ways to level it remain insufficiently studied.

Considering all of the above, one of the directions in the development of the methodology for solving the problems of ensuring energy security, including, among other things, methods for assessing and making managerial decisions in the fuel and energy complex, is the integration into the algorithm for solving the problems of ensuring the country's long-term energy security of such elements as analysis of uncertainty and risks, analysis of adaptability, analysis of the investment attractiveness of the economy and energy and analysis of the impact of the implementation of threats to energy security on the quality of life of the population (Fig. 1.10).



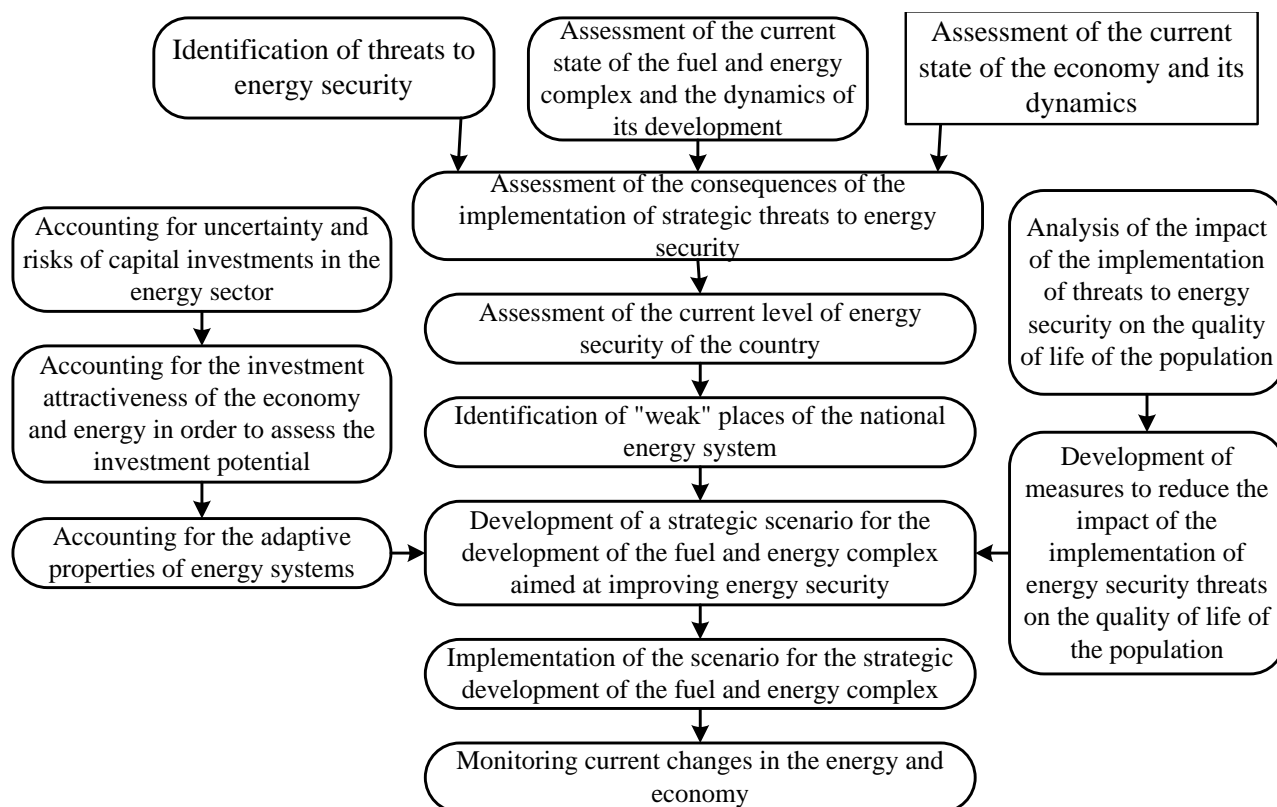


Figure 1.10 - Algorithm for ensuring long-term energy security

Source: compiled by the author

Improving the methodology for solving the problems of ensuring the energy security of Russia through the development of methods for analyzing the adaptability property of energy systems in combination with the use of investment analysis methods to assess the possibility of financing adaptation measures and structural changes in the fuel and energy complex will improve the quality of information used in the formation of strategic plans for the development of national energy, and the study of the mechanism impact of the implementation of threats to energy security on the quality of life of the population will help to increase the validity of strategic decisions aimed at improving the long-term energy security of the country.

**Chapter conclusions.** To achieve the goal of the thesis, the following tasks were solved in the first chapter:

- such issues as the content of the energy security concept, the evolution of the concept, the main factors and events that determined this evolution were analyzed;

– relevant ways to improve methodology of ensuring energy security were identified and described by making analysis of such issues as existing methodological approaches to the assessment of energy security, current change in interconnections between the economy and energy industry, new features of contemporary society.

A holistic picture of evolution of the energy security concept over the entire history of its existence has been attained. For the first time, the stages of evolution of the concept were identified.

The change in the semantic content of the energy security concept was considered against the background of ongoing historical events. An analysis of the socio-economic situation in a given period was made. Based on the analysis of existing definitions of energy security and the development of the concept, it was concluded that the content of the concept depends on the objectives of a study, as well as on geographical, political and socio-economic features of a country.

Existing indicators and methodological approaches to assessing the level of energy security of countries and regions were considered. This made it possible to identify the factors that determine both the assessment procedures and the choice of a set of indicators used by each specific researcher from the whole set of relevant indicators. An analysis of the evolution of the energy security concept, an analysis of foreign and domestic methodological approaches to assessing energy security, as well as a study of strategic threats to Russia's energy security made it possible to identify current directions in the development of a methodology for ensuring energy security. It was shown that further development of the methodology for ensuring energy security should be carried out by integrating into the algorithm for ensuring the long-term energy security of the country such elements as analysis of uncertainty and risks, analysis of adaptability, analysis of the investment attractiveness of the economy and energy industry, and analysis of the impact of the implementation of threats to energy security on the quality the life.

## **CHAPTER 2. ADAPTABILITY AS A FACTOR OF ENERGY SECURITY IMPROVEMENT**

### **2.1. Essence of energy systems adaptability**

The development of methods for ensuring energy security is on a par with such areas of research on large energy systems, such as: assessing the efficiency of the country's fuel and energy complex, forming optimal options for the development of energy, forecasting the development of energy systems, as well as developing measures to optimize the energy economy in accordance with changing conditions. Many researchers [10, 17, 19, 20, 22, 33, 33, 36, 81, 116] state that the need to develop the theory of control of large energy systems is based on the complication of the following issues:

- the relationship between the economy and energy industry;
- the development of new energy technologies;
- an increase in political tension;
- an increase in uncertainty in international energy markets and so on.

Existing decision-making methods in the energy sector and models that describe the relationship between the economy and energy must be modernized to take into account changing conditions.

Despite the great interest in the development of the theory of control of large energy systems and, in particular, to the issues of ensuring energy security, such a property of energy systems as adaptability has not been given sufficient attention. Adaptability is a fundamental property inherent in all open and developing systems, however, only in recent decades, the property of adaptability has been taken into account when analyzing and planning the development of energy systems. The ongoing studies emphasize the importance of such a characteristic of modern energy systems as adaptability [114, 260, 342], but at the same time do not offer any specific methodology for managing adaptability in the framework of solving energy security

problems. In other words, the development of the theory of adaptability of energy systems and taking into account this property are still not considered as necessary components of the process of managing large energy systems, as well as solving the problems of the vulnerability of the national economy to the implementation of strategic threats to the country's energy security.

The economic system of any level of organization (city, region, federal district, country) in the process of its functioning and development needs the supply of energy resources. At the same time, the economic system functions stably and develops when its demand for energy is provided in full. The supply of energy embodied in energy resources occurs due to the operation of the energy system, which, according to the definition of L. A. Melentiev and E. O. Steingauz, in general terms, is a set of power plants (generating, converting, transmitting, accumulating, consuming), interconnected by energy links in such a way that the operating conditions of these installations affect each other [125, 126].

If the economy and the energy industry operate under conditions of relative stability, when the energy system is provided with resources, and the economy, in turn, receives a sufficient amount of energy resources at an affordable price, the system is not stressed. However, when some event occurs, the nature of which can be diverse, the energy system experiences stress that can lead to a complete shutdown of the energy system, interruptions in the supply of energy resources, a significant increase in energy prices, and a decrease in the economic efficiency of energy companies. The return of the system to its original state (or the transition to a new state corresponding to the changed conditions for the functioning of the system) becomes possible due to the timely implementation of adaptation measures (Fig. 2.1.).

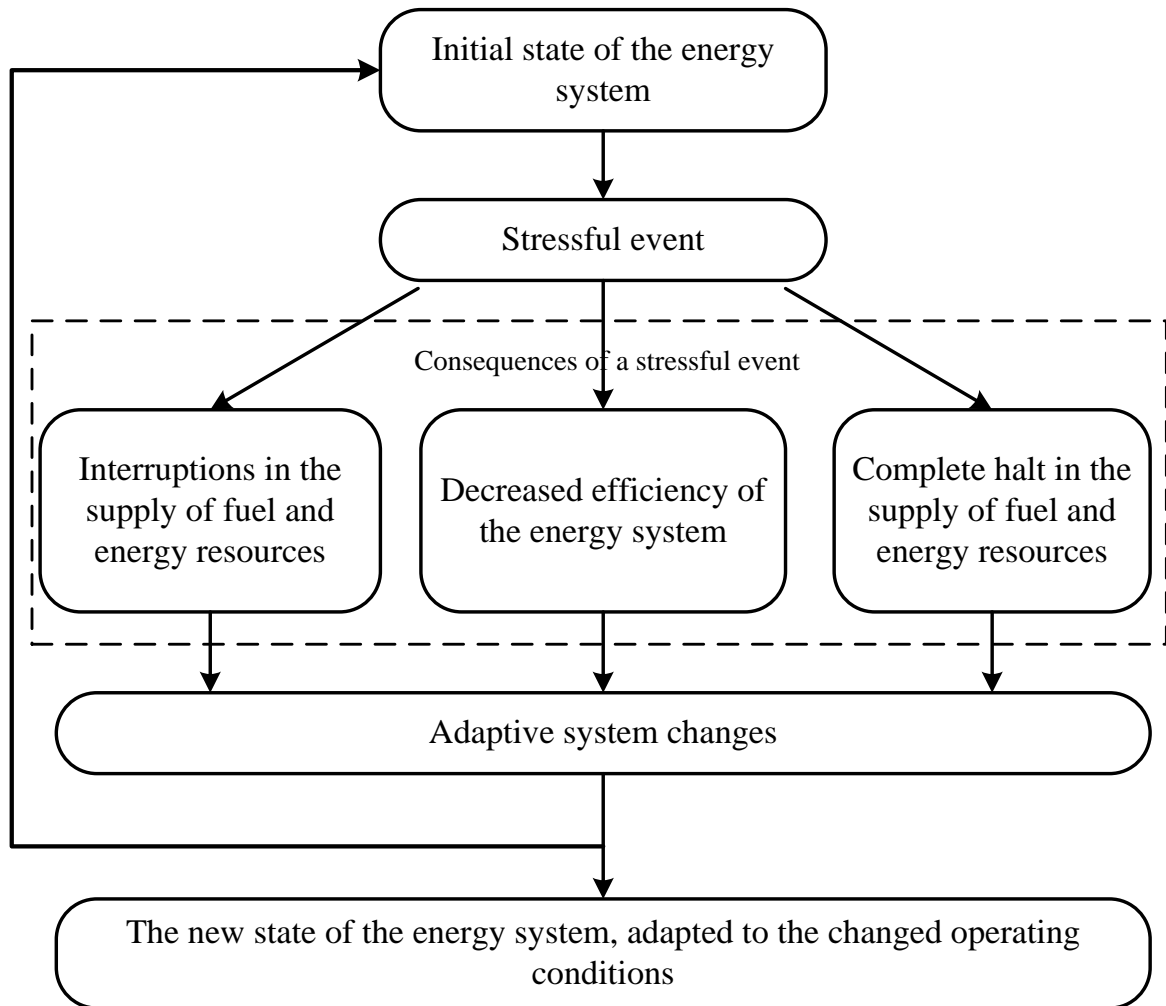


Figure 2.1 – Adaptation process

Source: compiled by the author

In general, system adaptability is understood as a property that allows the system to function under stressful situations, or in other words, that allows the system to withstand stress. The most common definitions of the concept of "adaptability" are given in table 2.1.

Table 2.1 – Definitions of the concept of "system adaptability"

Definition	Source
Adaptability (stability) of the system is the ability of the system to return to its original (or desired) state after a stressful situation.	Lin [286]
System resilience is the ability of a system to withstand severe disruption and recover within an acceptable time and at an acceptable cost.	Haines [250]
System adaptability is the quality or property of the system to restore its functionality.	Molyneaux [308]
The adaptability of the system is the ability of the system to withstand stresses while continuing to function.	Molyneaux [307]

The adaptability of a system is the ability of a system to: 1) withstand unexpected and random situations without catastrophic consequences, 2) respond to these situations, and 3) recover from them.	Rochas [322]
The adaptability of the system is the presence of a certain level of stress resistance, which allows absorbing fluctuations in the external environment, while maintaining the structure and other characteristics of the system's functioning. It is understood that the system can move to a new regime (a new state of equilibrium) as long as its structure and characteristics remain unchanged.	Sharifi [329]
The adaptability of the system is the ability of the system to absorb perturbations and reorganize in order to preserve its own functions, structure, identity and feedback.	Walker [351]
System adaptability is a measure of the ability of systems to perceive changes in the environment and maintain their functionality.	Holling [257]
The adaptability of the system is the ability of the system to return to its normal state of functioning after the occurrence of a stressful event.	Wiig [354]
Adaptability is the ability of a system to adapt to changes in the external and internal environment.	Karpovich [60]
Adaptation is the process of adapting an economic system/subject to changes that arise in the external and internal environment of its/his functioning through the development of special adaptation mechanisms.	Mierin [129]

Source: compiled by the author

In the process of adaptation, technical and organizational changes in the operation of the energy system occur, thanks to which the system adapts to changing external and internal conditions, continuing to effectively meet the needs of the economy in energy resources by optimizing the structure of power generating capacities, forming a given structure of consumption of primary energy resources, achieving the optimal volume and directions of supplies energy resources both within the region and beyond.

With regard to the possibility of achieving the set goals, any economic, social or production system is the more viable and efficient, the more adaptive it is. This rule also applies to energy systems of different levels of organization: the higher the level of adaptability, the more stress the energy system can survive.

The level of adaptability of an energy system is the reciprocal of its vulnerability level. The level of system vulnerability is the degree of environmental disturbance at which the system ceases to fully or partially function. A critical disturbance of the

environment is such an unfavorable change in which the energy system cannot adequately respond to a stressful situation, which leads to an inability to provide the volume of supply of energy resources required by the market.

The concept of "adaptability" is close in content to such concepts as "flexibility" and "stability". So the flexibility of the energy system characterizes its ability to "absorb" adverse events at the expense of internal reserves. That is, the higher the margin of safety of the system, the more reserves of different nature it has, the more flexible it is. The sustainability of the energy system is understood as its ability to adapt to changing external and internal conditions without attracting additional costs. This situation is possible due to the fact that internal reserves and resources can be used for reorganization, and the initial version of the development of energy systems can be slightly changed. The difference between stability and adaptability of a system is that the adaptability property of a system implies its ability to change structurally and organizationally using internal resources, reserves and attracting additional investments. That is, adaptive mechanisms involve not only the internal reserves of the system (as in the case of sustainability mechanisms), but also resources that can be attracted on a commercial basis from outside (Table 2.2).

Table 2.2 – Features of the manifestation of the properties of flexibility, stability and adaptability of systems

The power of stress	System property	Characteristic
Low or Medium	flexibility	The system continues to function effectively due to the presence of internal reserves of various nature
Moderate	stability	The system continues to function effectively due to the presence of internal reserves, as well as due to the ability to self-organize
Significant	adaptability	The system restores the efficiency of its functioning through the implementation of adaptation measures that require additional costs

Source: compiled by the author

The definitions used in this study are close to the definitions given by A. I. Karpovich. Exploring the problems of modeling the economic stability of energy systems, A. I. Karpovich understands the stability as the ability of a system under conditions of fluctuations to ensure the implementation and maintenance of its target settings at certain levels [60]. System flexibility is understood as “the ability to adapt without structural changes, for example, by creating various types of redundancy (production capacity reserves, stocks of raw materials, materials, fuel, etc.)” [61, p. 156]. Adaptability, in his opinion, is the ability of the system to adapt to changes in the external and internal environment.

For foreign authors, the concepts of adaptability and resilience are not clearly distinguished. Moreover, the concept of adaptability is used extremely rarely. L. Hughes [261] can be named among the scientists involved in solving the problems of ensuring energy security and clearly distinguishing between these two concepts. L. Hughes highlights the following differences between these concepts:

- stability – returns the system to the pre-crisis state;
- adaptability – changes the system so that it continues to function normally in new conditions.

These definitions in terms of content coincide with those adopted in this study, except that L. Hughes does not specify by what means (internal or external) the adaptive change of the system or its return to the pre-crisis state takes place.

Thus, adaptability is a broader concept that includes the concepts of flexibility and stability. At the same time, the level of adaptability is also determined by factors that provide both flexibility and stability of the system (Fig. 2.2).



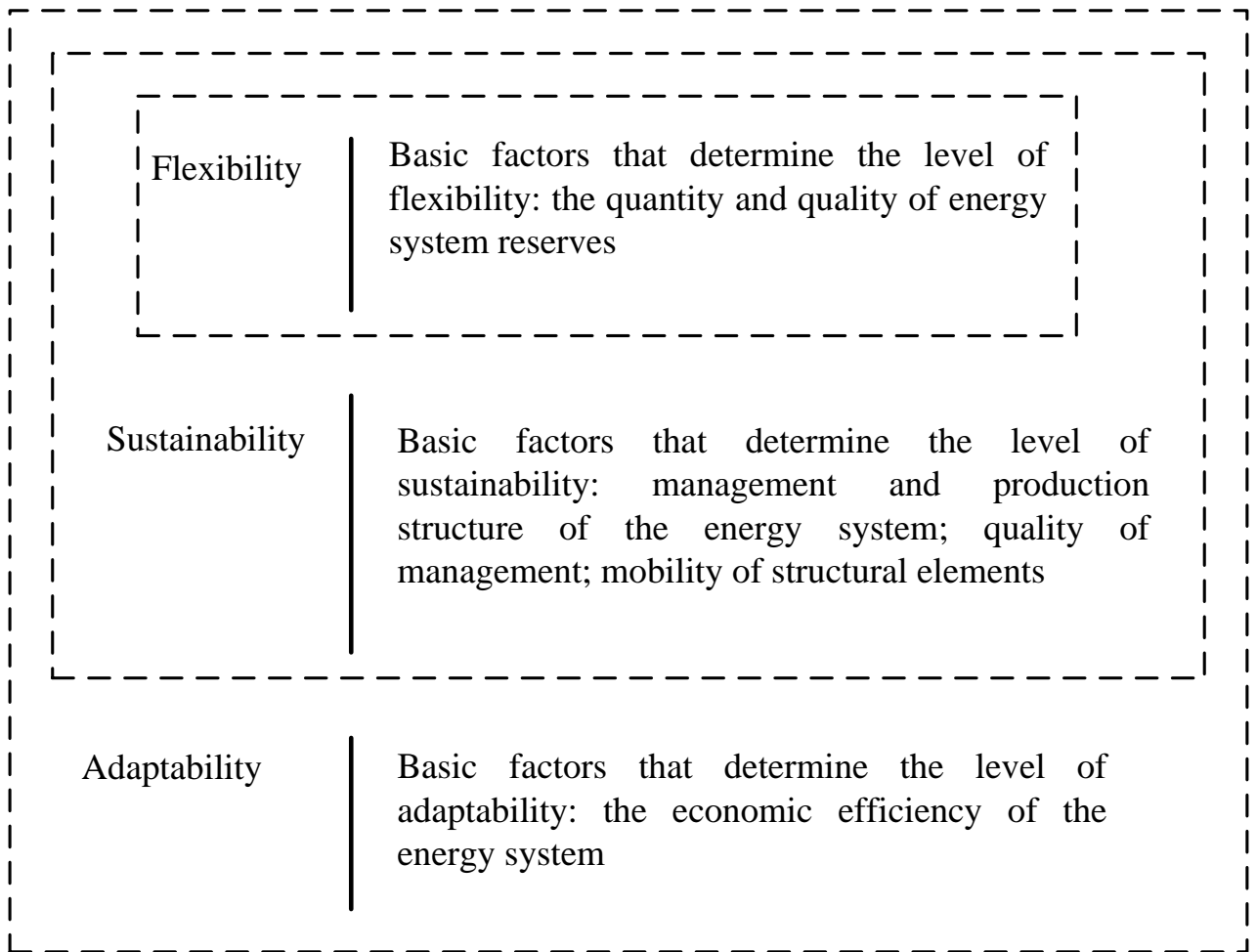


Figure 2.2 – The relationship between the properties of adaptability, stability and flexibility of the system

Source: compiled by the author

Significant scientific and practical results in the field of analysis of the adaptability of energy systems were obtained by V. A. Smirnov [174, 175]. These results, on the one hand, are useful for modern research, but on the other hand, they should be reviewed in the context of the current state of affairs, since V. A. Smirnov considered the adaptability of the energy system as its ability, under the influence of external disturbances, to fulfill the set plan using additional costs by output (Fig. 2.3).

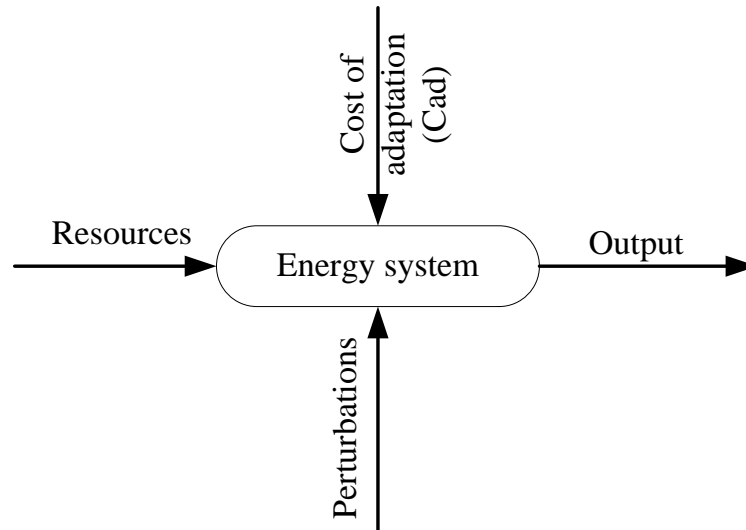


Figure 2.3 – Adaptation property according to V.A. Smirnov

Source: [175]

V. A. Smirnov estimated the level of adaptability of the system using the following formula:

$$Ad = \frac{C_{ad}}{C_0} \quad (2.1)$$

where  $C_{ad}$  are the costs of adaptation to a given environmental disturbance;

$C_0$  - planned costs necessary to fulfill the set plan for the production of products.

The lower the  $A_d$  index, the more adaptive the system.

In modern conditions, the purpose of the existence of the economic system is not the exact implementation of the plan for the production of products, but the achievement of the set goals, which can be: maximizing the profits of energy companies; ensuring economic growth with a sufficient amount of energy resources; expanding the energy potential of the country, improving the quality of life of the population, etc. When assessing the adaptability of energy systems and options for their development, it is necessary to understand what and for what adaptation takes place.

The amount of adaptation costs and the type of adaptation measures, their structure, the nature of their distribution over time (one-time or carried out in several stages) depend on the nature of the stressful situation. Depending on the nature of

occurrence, stressful situations can be broadly grouped into the following groups [92]:

- financial and investment: increase in lending rates, unfavorable currency fluctuations, delays in financing investment projects, rising inflation, worsening conditions for access to capital markets, worsening financial condition of investors, etc.;
- production: accidents, production shutdowns, changes in global energy flows, the emergence of new technologies for the extraction, processing and transportation of energy resources, etc.;
- market: sharp changes in the level of prices for various types of energy resources, the volume of demand for energy resources, the terms of international trade, etc.;
- socio-political: increased political tension in relations between countries, tougher requirements for the level of environmental safety of energy facilities, etc.

In the event of financial and investment stressful situations, adaptation costs may be associated with an increase in required capital investments, reorganization costs, loan servicing costs, etc. Stressful situations of an industrial nature can lead to both one-time costs for eliminating the consequences of accidents and prolonged costs to improve production efficiency. Unfavorable changes in the market environment, as a rule, require prolonged costs for the development of a new market strategy for energy companies and its further implementation. Adaptation of energy systems to stressful situations of a socio-political nature often requires government spending on the implementation of new large-scale energy projects that are economically inefficient, but expedient from the point of view of new operating conditions.

The option of developing energy systems, which allows for large adverse changes in conditions that can be offset by lower costs, is more adaptive. However, the indicator of adaptability of the option for the development of energy systems, being an important criterion for evaluating and selecting alternative options, is not the only criterion. The low level of adaptability of the option for the development of

energy systems is not a sufficient condition for its rejection, since if the option provides a sufficient amount of energy resource and appropriate infrastructure for the optimistic option for the country's economic development, it can be accepted for implementation.

Some authors say that the main characteristic of the level of adaptability is not the amount of costs for adaptation, but the time required to restore the system after a stressful event [322]. On fig. 2.4 shows the process of restoring the efficiency of the system after a stressful event. The value  $\Delta t = (t_1 - t_0)$  determines the level of adaptability of the system to the considered type of stress situations. The shorter the period of time required to restore the efficiency of the system, the more adaptive it is.

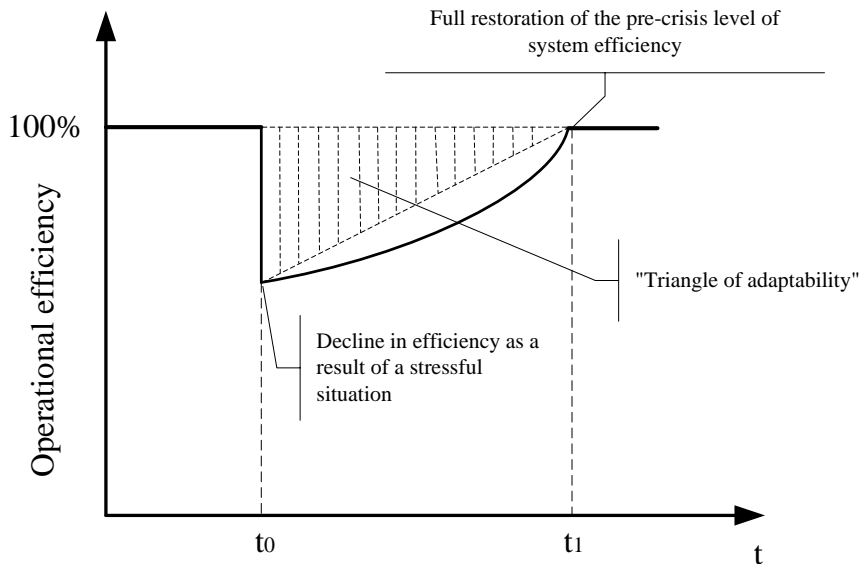


Figure 2.4 – Dynamics of uniform recovery of the system

Source: [307]

Combining both criteria - the degree of sensitivity of the system to stress and the time required for its recovery - the level of adaptability of the energy system can be described by the area of the "adaptation triangle". The area of the triangle depends on the size of the decrease in the efficiency of the system functioning during the implementation of this stressful event and on the length of time required to restore the system. Thus, the smaller the area of the triangle, the more adaptive the system, *ceteris paribus*. Accordingly, in order to increase the adaptability of the system,

efforts should be aimed at reducing the possible negative consequences of the implementation of certain threats, as well as creating such a structure in which the system could restore its efficiency as quickly as possible after the onset of an adverse event.

When analyzing the level of adaptability of the system, the "triangle of adaptability" can take into account the uneven process of falling and restoring the efficiency of the system (Fig. 2.5).

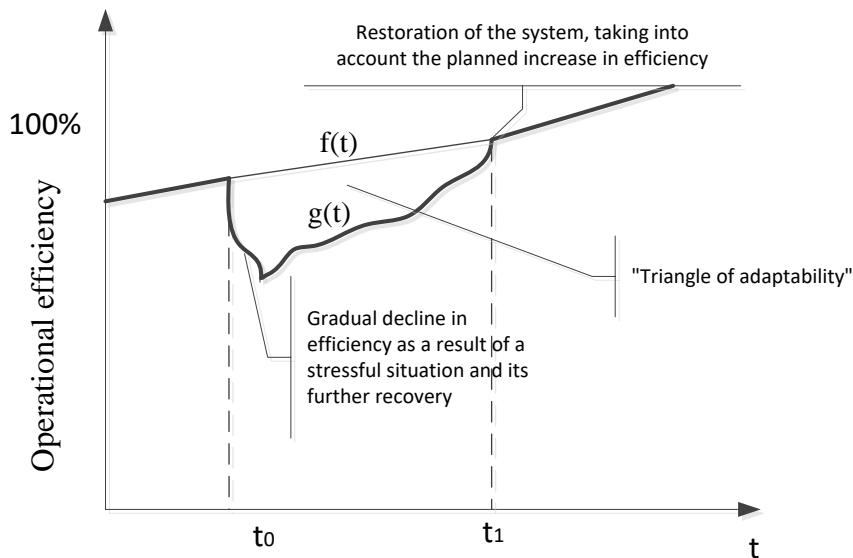


Figure 2.5 – The area of the "adaptation triangle" with an uneven process of restoring the efficiency of the system

Source: [322]

With an uneven process of restoring efficiency, the size of the "adaptation triangle" is as follows:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} (f(t) - g(t)) dt \quad (2.2)$$

The recovery time of the system as a characteristic of the adaptability of energy systems can be used to assess the response of the system to short-term stressful situations - for example, disruptions in the production process, where the recovery time of the system is calculated in hours. However, with regard to the implementation of strategic threats to the national energy system, this characteristic of adaptability is

not very informative, since the reaction of the system to the implementation of the threat is of a long-term nature, and the characteristic of the system's efficiency in the long term is not so obvious, since not only the characteristics of the system's operation change over time, but also socio-economic conditions in the context of which the effectiveness is evaluated.

The scientific literature does not reflect the fact that the adaptability of energy systems can be static and dynamic. Static adaptability is described above as the ability of a system to return to a pre-crisis level of economic efficiency, productivity, or other parameter within an acceptable period of time. However, taking into account the fact that energy systems are open systems that are actively developing in changing operating conditions, special attention should be paid to dynamic adaptability (development adaptability) when assessing the level of adaptability of energy systems. Dynamic adaptability (development adaptability) is the adaptability of the energy system development option, that is, the system's ability to ensure that its elements are changed in the process of its own development in accordance with the dynamics of economic development. The variant of the development of the energy system has greater adaptability, which, with less time and financial costs, levels out negative changes in the environment while maintaining the target indicators for the development of the energy system. Unlike static adaptability, where the energy system is considered in the context of a return to the original equilibrium state, the property of dynamic adaptability enables the system to find new equilibrium states in the process of its development.

Thus, the property of static adaptability of energy systems is of interest in the analysis of the safety and reliability of their functioning in the short term under the conditions of emerging short-term stressful situations. When considering issues related to the compliance of the development of the country's fuel and energy complex with the development of the economy, the consequences of the implementation of strategic threats to energy security, and the development of options for the long-term development of the national energy system, the dynamic adaptability of energy systems comes to the fore. The difference between static and

dynamic adaptability must be taken into account when choosing methods for assessing the current state and developing strategic plans for the development of energy systems.

Academician A. A. Makarov proposes the following quantitative indicator of the sustainability of scenarios for the development of energy systems in Russia. By sustainability, he understands “the ability of a system to maintain its structure and development trajectory under external and internal influences” [172, p. 113].

$$\delta G_{kt} = \frac{G_{kt} - G_{t0}}{G_{t0}} \quad (2.3)$$

where:  $G_{kt}$ ,  $G_{t0}$  – volumes of Russian GDP in the t-th period under the target scenario and risk scenario k, respectively.

To assess the stability of the scenario for the entire forecast period, it is proposed to sum up the values of the indicators calculated for each period, taking into account discounting:

$$\delta G_k = \frac{\sum_{t=0}^T \delta G_{kt}}{(1+r)^t} \quad (2.4)$$

where:  $r$  – discount rate.

The proposed indicator shows how much the actual volume of GDP will deviate from the volume of GDP assumed in the scenario due to the realization of one or another threat.

The property of static adaptability determines the static balance of the energy system, which refers to such a state of the system in which the production potential of the energy sector fully meets the needs of the energy resources of the country's economy. The property of dynamic adaptability determines the dynamic balance of the energy system, which means such a state of the system in which the dynamics of energy development corresponds to the dynamics of socio-economic development, thereby ensuring the energy security of the country. An illustration of the dynamic adaptability property of the energy system is shown in Figure 2.6.

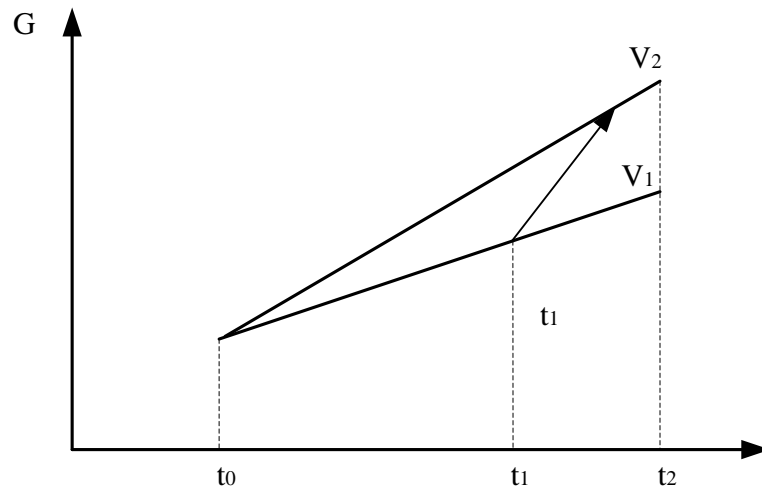


Figure 2.6 – Options for the development of the energy system

Source: compiled by the author

Figure 2.6 shows two options for the development of the energy system, which differ in the growth dynamics of the total generating capacity of all power plants ( $G$ ) for the period under consideration  $[t_0; t_2]$ . Option  $V_2$  assumes a larger increase in generating capacity than option  $V_1$ . The choice of one or another option depends on the forecast of economic development. If the forecast for the development of the economy with lower growth rates is accepted, the energy development option  $V_1$  is selected. However, over time, it may be revealed that the growth of generating capacities under option  $V_1$  is not sufficient to meet the growing needs of the economy in energy resources. Then, at some time  $t_1$ , additional expenditures must be made in the development of the energy system in order to change the development trajectory from  $V_1$  to  $V_2$ . The lower the cost, including time, this can be done, the more adaptive the energy system.

The transition of the energy system from one development trajectory to another may require additional capital investments, the amount of which, among other things, may depend on the required transition time from one trajectory to another. On fig. 2.7 shows the increase in the required capital investment for the adaptation of the development of the energy system ( $I_2 - I_1$ ), while this adaptation will require additional time ( $t_3 - t_2$ ).



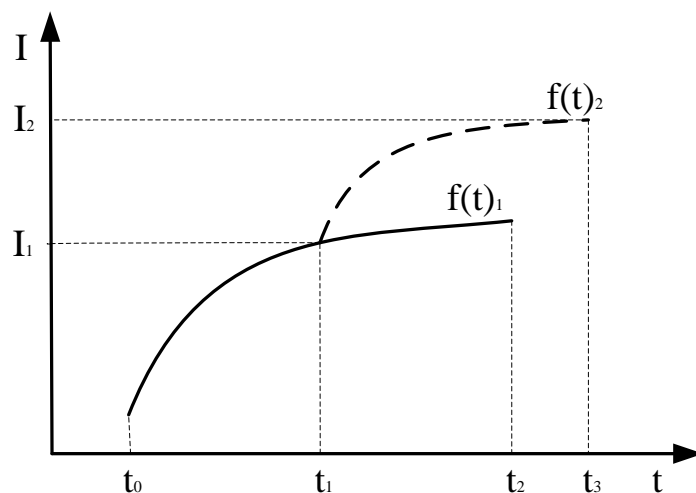


Figure 2.7 – Change in energy system development costs as a result of unfavorable changes in operating conditions

Source: compiled by the author

However, if necessary and under certain conditions, the planned commissioning dates for generating capacities can be met by additionally increasing the financial costs of adaptation (Fig. 2.8). In this case, the development trajectory with  $f(t)_1$  turns into the trajectory  $f(t)_2$  with additional capital costs  $(I_3 - I_1)$ .

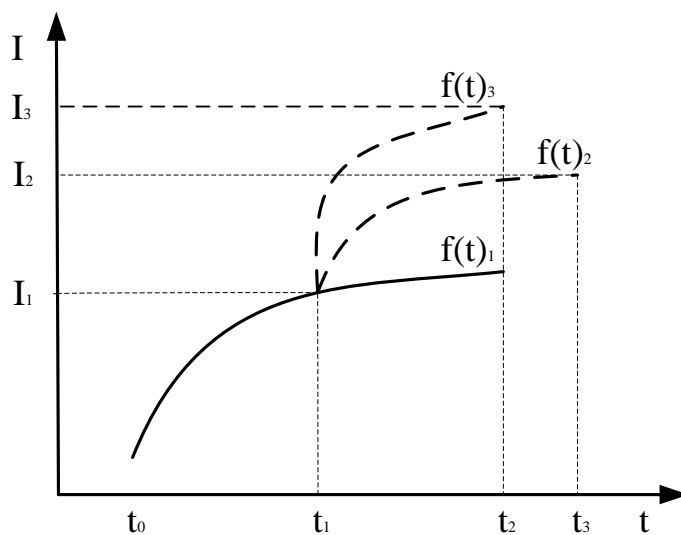


Figure 2.8 - Options for changing the amount of invested funds over time when implementing adaptation measures

Source: compiled by the author

Based on the analysis of the available scientific literature devoted to the problems of revealing the adaptability properties of complex systems of various nature, we can propose the following definition of adaptability. Adaptability is the ability of complex systems, in order to ensure their stable functioning, to adapt to adverse changes in the external and internal environment, both through the use of internal reserves and by attracting external resources.

Taking into account the adaptability of energy systems in the strategic planning of the development of the fuel and energy complex, as well as in order to ensure energy security, will increase the level of efficiency in the functioning of energy systems. Adaptability to one degree or another is inherent in all energy systems, but the levels of their adaptability are different. Factors that determine the level of adaptability of energy systems will be discussed below. Here we note that the higher the hierarchical level of the energy system under consideration, the more difficult and expensive the adaptation measures to changing conditions. This circumstance is explained by the fact that the higher the level of organization of the energy system, the more inertial it is, that is, it requires large financial, time and labor costs to change the parameters of its functioning.

## **2.2. The role of energy systems adaptability in ensuring energy security**

Since the process of ensuring energy security is associated with decision-making under conditions of high uncertainty, it is similar to the process of strategic risk management, which consists of the following steps:

- recognition of risks;
- assessment of the likelihood of their implementation;
- assessment of the consequences of the implementation of identified risks;
- choice of method for influencing the risk;
- development of specific risk management measures and their implementation.

The choice of a method of influencing risk implies a choice of the following options:

- risk acceptance. It is carried out if the risk situation is unlikely, and its consequences are not catastrophic. In this case, the presence of this risk is recorded, the dynamics of its development is controlled, but specific managerial and organizational measures are not taken;

- risk reduction. This method implies that the activity of the risk management subject is not aimed at changing the system, but at changing the environment of its functioning in order to ensure more reliable and safe operation of the system itself;

- reducing the consequences of the implementation of a risky situation. In this case, the object of influence is the system itself. The impact on the system is carried out in order to change its individual elements or the structure of its inter-element connections to reduce the sensitivity of the system to the implementation of risk situations.

With regard to large energy systems, the main method of influencing the strategic risks of energy security in most cases is the development of the systems themselves in order to reduce the consequences of the implementation of risk situations. This circumstance is explained by the fact that the impact on the functioning environment of large energy systems seems to be an extremely difficult task, since the functioning environment of the national energy system actually covers all aspects of the life of modern society, including changes in the global economy and energy caused by scientific and technological progress, competition in international energy markets and geopolitical activity of countries.

Changes in the energy system aimed at increasing its resistance to stress affect its adaptive properties. That is, the main way to reduce the consequences of the implementation of strategic threats to the energy security of the country is to increase the adaptive properties of the national energy system.

The level of adaptability of the energy system can increase or decrease as a result of management decisions. Therefore, adaptability is a characteristic that, on the one hand, should be used as one of the criteria for choosing an energy development strategy, and on the other hand, a characteristic that management efforts should be directed to increase as part of solving energy security problems.

Assessment of the current level of adaptability and analysis of the adaptive properties of the energy system are an element of the process of managing the adaptability of energy systems, necessary for:

1. Estimates of the current risks of the functioning of the energy system. The beneficiaries of the analysis in this case are the heads of energy companies who need an objective assessment of operational risks; large energy consumers who are interested in determining the riskiness and reliability of the supply of energy resources in order to make managerial decisions; government officials involved in the development and implementation of energy and economic policy.

2. Development of a set of strategic measures for the development of the energy system. Energy systems have a high inertia of their development, which implies the need for a long time and large financial investments to implement structural changes in their parameters. Therefore, in order to make strategic decisions regarding the long-term development of the energy system and aimed at ensuring energy security, it is necessary to analyze long-term trends and conditions for its functioning.

Assessment of the current level of adaptability of the energy system (or, in other words, its static adaptability) is the first stage in the process of managing the adaptability of the energy system (Fig. 2.9).

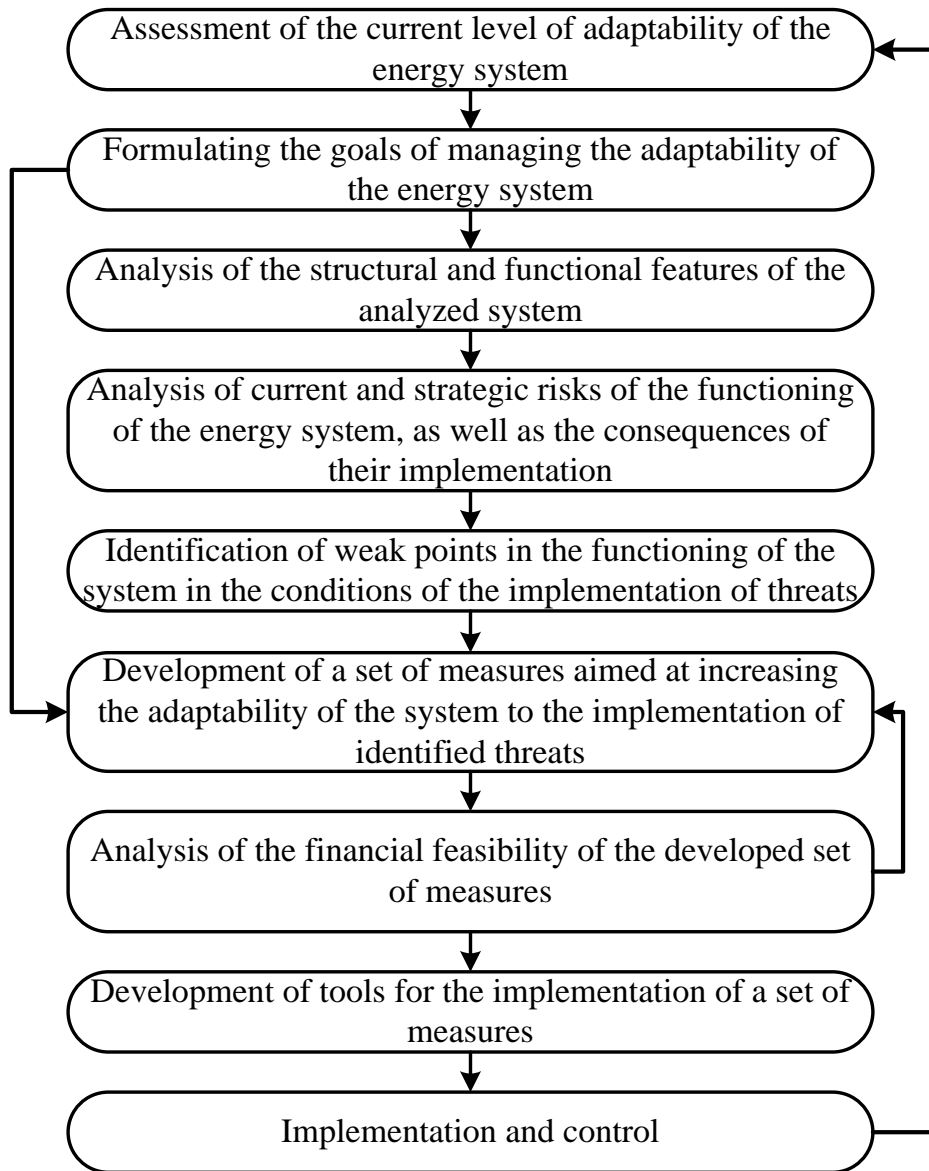


Figure 2.9 – The process of managing the adaptability of the energy system

Source: compiled by the author

The process of managing the adaptability of the energy system can be used as a tool to improve the efficiency and reliability of its operation, as well as to solve the problem of ensuring long-term energy security (Fig. 2.10). The need to solve the problem of ensuring the country's long-term energy security leads to the need to improve the quality of strategic planning for the development of the national energy system, which should lead to an increase in the efficiency of the national energy system, which in turn requires an increase in the adaptive properties of the energy sector.

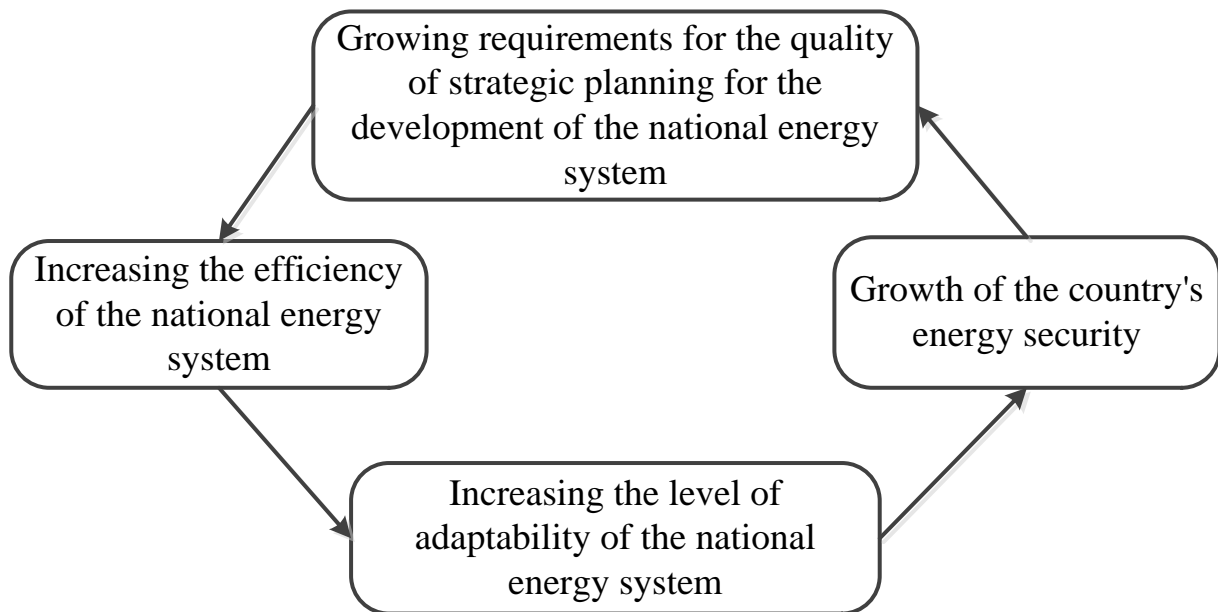


Figure 2.10 - Relationship between a number of tasks of strategic planning for the development of the country's fuel and energy complex

Source: compiled by the author

The increase in the level of adaptability of the national energy system occurs in the long term, therefore, a situation may arise when, in the process of managing the energy system, more attention will be paid to short-term tasks of increasing the economic efficiency of the energy sector. Focusing on short-term tasks of improving the economic efficiency of the oil and gas complex can lead to an increase in revenues of energy companies and the state in the medium term, but in the long term, the risks of realizing threats to the country's energy security may increase. For example, if the state encourages the development of the extraction and processing of relatively cheap types of energy resources (natural gas and oil) and loses sight of the development of alternative energy sources and new energy-saving technologies, a growing imbalance between the types of energy resources consumed may threaten the country's energy security.

The adaptability of energy systems should be managed both at the local level (the level of individual companies in the energy industry) and at the global level (the level of the country's energy system). Accordingly, decisions aimed at increasing the level of adaptability of energy systems should be made by both the heads of energy

companies and the state. Decisions by company management on the development of energy systems under their control increase their adaptability in order to ensure the sustainability of the company's business and increase profitability. That is, the main goal of increasing the adaptability of energy systems by companies is to reduce economic risks and stabilize the generated income. The state, developing strategic plans for the development of the national energy system, is aimed at improving the efficiency of the functioning of the energy sector and the national economy, combined with an increase in the level of energy security. Thus, the subject that makes managerial decisions regarding increasing the adaptability of the national energy system in the context of solving the problems of ensuring the energy security of the country is the state. Table 2.3 systematizes the differences in the goals and tools for managing the adaptability of energy systems between the state and energy companies.

Table 2.3 - Goals and tools for managing the adaptability of energy systems used by the state and energy companies

Energy companies	State
The goal of increasing the level of adaptability of energy systems	
Reducing the economic risks of the company's operation.	Increasing the efficiency of the country's economy and energy, increasing the level of energy security.
Tools for increasing the adaptability of the energy system	
Implementation of investment projects that increase the level of adaptability of energy systems; development and direct implementation of organizational measures that increase the adaptability of the company as a whole; making decisions on the size of financial and production reserves, etc.	Subsidizing, concessional lending, preferential taxation, etc.
Priority period	
Short and medium term	Long term
The main risks that the adaptability management process aims to mitigate	
Risk of loss of competitiveness; risk of accidents and production shutdowns; change in the structure of demand for energy resources, etc.	Risk of major accidents; the risk of a significant increase in energy prices; the risk of a shortage of generating capacity, etc.

Source: compiled by the author

Adaptability management, along with the risk management process for the functioning of energy systems, is one of the effective tools for solving the problems

of ensuring the energy security of the country. The process of making current and strategic management decisions aimed at increasing the adaptability of the national energy system is based on the analysis of current (current prices, costs, technologies, etc.) and forecast (price dynamics forecast, supply and demand dynamics, exchange rates, inflation, etc.) initial data.

Currently, both domestic and global energy industries operate in conditions of high uncertainty and volatility of the main technical and economic indicators due to high rates of scientific and technological development, an increase in the share of renewable energy sources in the fuel and energy balances of developed countries, the ongoing globalization of energy markets, international socio-political instability, growing requirements for the environmental safety of energy facilities, etc. The uncertainty of the initial data directly affects the process of managing energy systems. Under these conditions, the question of the quality of forecasts for the development of the energy sector, energy markets, and the global and regional economy is particularly acute.

Since energy systems and their elements are complex technical objects that require significant time and financial costs for their creation, and have been operated for decades (the essence and features of energy systems are well considered in [18, 34, 71, 126, 137, 200, 292]), planning and implementation of the development of energy systems requires long-term forecasting of the dynamics of the world economy, the economy of the country and regions, individual energy and commodity markets, scientific and technological progress, etc. Forecasts of changes in such a large number of complex variables are obviously data that have one degree or another. reliability. The level of reliability of the initial data is determined by many factors: from the quality of the models used to obtain them, to the characteristics of the analyzed systems.

Energy systems are highly inertial systems, slowly adapting to changes in the conditions of their functioning [38, 70, 73]. Therefore, the management of energy companies and the government of the country must rely on reliable data to make management decisions regarding options for the development of energy systems. A



high level of initial data reliability is a critical condition for making effective management decisions. Decisions made using the right methods and procedures, but based on poor quality information, will be ineffective. In this regard, the question arises about the level of permissible error in the initial data used in making strategic management decisions in the tasks of ensuring long-term energy security.

Many scientists have been and are engaged in the problems of making managerial decisions under conditions of initial data uncertainty both in the economy as a whole and in the energy sector in particular. For example, in the energy sector, the problem of initial data uncertainty is considered in the context of assessing the economic efficiency of large-scale investment projects [25, 28, 49, 62, 63, 69, 124], within the framework of energy systems management [48, 66, 152, 306], assessment of the country's energy security [23, 24, 32, 35, 53, 77, 224, 334], assessment of the necessary levels of reserves to ensure an uninterrupted production process [72, 89, 174], etc. Analysis of managerial decision-making processes in the energy sector and modeling development of energy systems helped to identify the following factors that directly affect the level of permissible error of the main initial data.

The first factor relevant to energy systems at any level of organization is the forecast horizon. The forecasting horizon covers the period of time from the present to the future, in which it is planned to implement a particular management decision (decisions to invest in a particular project, to reorganize production, to increase production), and for which it is necessary to make a forecast of the main initial data. The longer the forecasting horizon is, the more inevitable for objective reasons will be a decrease in the level of data reliability (Fig. 2.11). At the same time, the requirement for the accuracy of the values of indicators remote in time is also reduced, since the longer the forecasting horizon, the higher the level of permissible error. This factor is especially relevant for energy systems, where the forecast horizon can be 20-25 years.

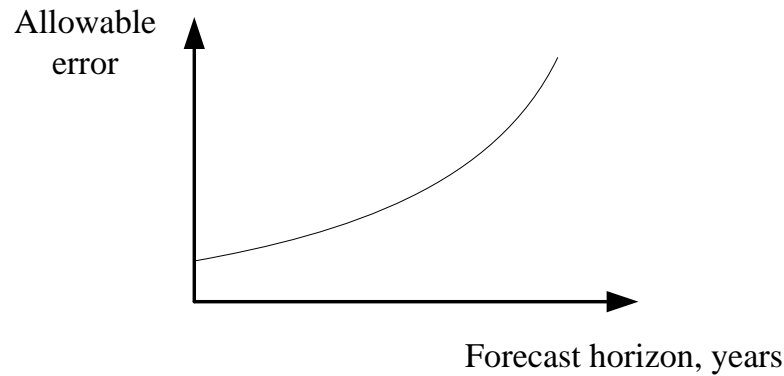


Figure 2.11 – Dependence of the level of permissible error of the initial data on the forecasting horizon

Source: compiled by the author

This statement can be illustrated by the example of cash flow discounting, which shows that the impact of an error in the initial data related to the long term on the current management decision is greatly reduced (Table 2.4).

Table 2.4 – Conditional cash flow analysis

Year	Discount $(1/(1+r)^n)$ at discount rate (r) 15%	Discounted cash flow of the current year, mln rub.	Total discounted cash flow, mln rub.	Share of the current year in the total discounted cash flow, %
1	0,870	869,57	869,57	13,89
2	0,756	756,14	1625,71	12,08
3	0,658	657,52	2283,23	10,50
4	0,572	571,75	2854,98	9,13
5	0,497	497,18	3352,16	7,94
6	0,432	432,33	3784,48	6,91
7	0,376	375,94	4160,42	6,01
8	0,327	326,90	4487,32	5,22
9	0,284	284,26	4771,58	4,54
10	0,247	247,18	5018,77	3,95
11	0,215	214,94	5233,71	3,43
12	0,187	186,91	5420,62	2,99
13	0,163	162,53	5583,15	2,60
14	0,141	141,33	5724,48	2,26
15	0,123	122,89	5847,37	1,96
16	0,107	106,86	5954,23	1,71
17	0,093	92,93	6047,16	1,48
18	0,081	80,81	6127,97	1,29
19	0,070	70,27	6198,23	1,12
20	0,061	61,10	6259,33	0,98

Source: compiled by the author

As can be seen from table 2.4, the first 5 years form 54% of the total discounted annuity cash flow at a discount rate of 15%. Therefore, in order to obtain reliable data on the options for the development of energy systems in the short term, it is necessary to use high-precision, disaggregated models for predicting changes in relevant technical and economic indicators. For the long and medium term, aggregated models, expert estimates, as well as forecasts based on the analysis of long-term trends can be used.

The second factor that determines the degree of permissible error of the main initial data is the level of adaptability of the energy system: the higher the level of adaptability of the system, the greater the level of error is acceptable when choosing a variant of its development. An adaptive system is able to "adjust" to the errors in the initial data without reducing its efficiency.

The third factor that determines the level of permissible error of the main input data is the economic efficiency of the functioning of the energy system and its individual elements. The more efficient the system, the less sensitive it is to forecast data errors, all other things being equal, since it has a certain margin of safety. Deterioration of the actual operating conditions of the system will lead to a decrease in the values of performance indicators. The degree of deterioration of the actual conditions will be the higher, the higher the current efficiency of the energy system.

However, the level of permissible error is determined not only by the value of the excess of the value of the efficiency indicator of the state of the system over its critical value (for example, if such a final indicator is NPV, then its value is greater than 0), but also by the level at which an alternative option for the development of the energy system will be chosen. On fig. 2.12 provides an example of critical levels of input data values. The price of the energy resource is predicted within the boundaries of  $P_1$  and  $P_2$ . For these initial data, a variant of the development of the energy system is selected, the efficiency of which is described by the straight line  $V_1$ . However, if the upper limit of the predicted price reaches the level  $P_{max}$ , the option of developing the energy system  $V_2$  can be chosen, which is characterized by access to other sales

markets, the construction of other technological installations (construction of a thermal power plant instead of a thermal power plant), a change in the installed capacity of energy facilities, etc. In this regard, we can say that the interval  $[P_1; P_{max}]$  is the limit of the permissible error, since if the actual price of the energy resource falls into this interval, the  $V_1$  option will be supported. A similar situation may occur if the actual price falls below the forecast level  $P_1$ .

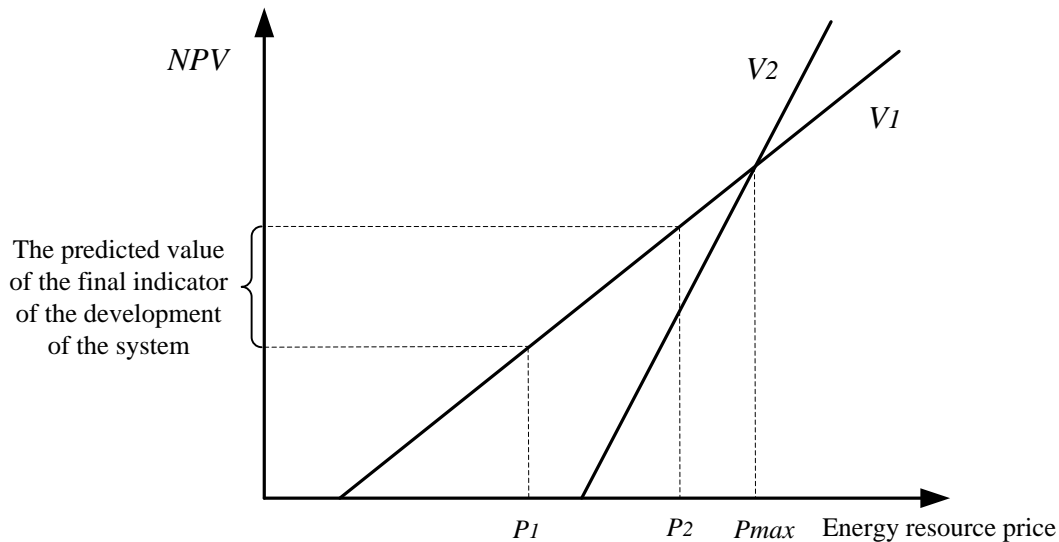


Figure 2.12 – Critical levels of initial data values

Source: compiled by the author

Thus, the level of permissible error is determined not only by the efficiency of the energy system development option, but also by the level of the main technical and economic indicators, at which an alternative development option is chosen.

The fourth factor influencing the level of permissible error of the main initial data is the composition of the tasks to be solved. The composition of the tasks to be solved determines the impact of the accuracy of the initial data on the managerial decision being made. The tasks to be solved can be:

- current value;
- tactical value;
- strategic value.

Tasks of the current value are tasks that are solved in the process of current management of energy systems, requiring the most complete and accurate information about the state of the system and the conditions for its operation.

Tasks of tactical importance include tasks of the medium-term forecasting horizon, the solution of which concerns the development of the energy system in the current trajectory of its development: expansion or reduction of production volumes, increasing production potential, building new industrial sites, concluding contracts for the supply of energy resources, etc.

Tasks of strategic importance cover tasks, the solution of which belongs to the area of the long-term development trajectory of the entire energy system: the development of renewable energy sources; entering new markets; choice of hydrocarbon transportation method; implementation of large-scale investment projects for the launch of new fields, etc. When solving strategic problems, one can hardly speak of the availability of reliable initial data, since these data concern not only and not so much the current and medium-term development of the situation, but long-term forecasts for the development of the global and national economy, socio-political changes, scientific and technological progress in the field of mining, processing and transportation of energy resources, etc. Therefore, to solve strategic problems, sometimes they use not only data obtained using complex, proven and well-established models, but also expert assessments.

Having considered the factors influencing the level of permissible error, we can conclude that the value of the permissible error of the initial data is the higher, the less it affects the conclusion about the result of the implementation of the option for the development of the energy system, and hence the adoption of a managerial decision, and the adaptability management process energy systems in the framework of solving the problems of ensuring energy security, depending on the horizon under consideration, has different requirements for the accuracy of the information available and the form of decisions made. Under the conditions of static adaptability management, when management decisions relate to the construction or modernization of specific elements of the system and a detailed technical and economic analysis of

the operation of the energy system is required, the permissible error should be minimal. At the same time, the process of managing dynamic adaptability, in which the managerial decisions made are aimed at creating an institutional environment conducive to the development of the national energy system in the direction that provides the highest level of its adaptive properties, affecting areas with high uncertainty of the initial data, allows for their large error.

### **2.3. Contemporary factors that determine energy systems adaptability**

Assessment of the current level of adaptability of energy systems, as well as the process of strategic planning for the development of the national energy system in order to solve the problems of ensuring the energy security of the country, require knowledge of the factors that determine the level of adaptability of energy systems in modern conditions. Analysis of the research works of S. Arakawa [206], G. N. Antonov [9], L. A. Melentiev [125, 126], Yu. D. Kononov [71], V. A. Smirnov [174, 175], T. Berglund [213], P. Zweifel [363], published from the 1970s to the 1990s, showed that the main factors and criteria that determine the adaptability of energy systems were:

- availability of hydrocarbon reserves or (in the case of importing countries) stable supplies of hydrocarbons from exporting countries;
- availability of capacity reserves that could be used in the event of a sharp increase in domestic demand for energy resources;
- the nature of state support for national fuel and energy complexes;
- the level of development of related industries that provide material resources for the fuel and energy complex of the country;
- the presence of large power plants to ensure economies of scale, when the cost of installing one kW of power plant capacity decreases with an increase in its installed capacity.

Systematizing the factors that determine the level of adaptability of energy systems, V. A. Smirnov singled out the following three groups [175]:

1. Factors affecting the creation of reserves and surpluses in the operation and development of energy systems. If there are reserves, these resources can be used to offset the disturbing impact on the system.

2. Factors that determine the structural flexibility of the system: the ratio of fixed and variable costs; the ratio of infrastructure costs and costs in general for the development or creation of an energy system; the share of costs for the creation of the most inertial elements of the system, etc.

3. Factors related to the nature of the distribution over time of the costs of creating or developing an energy system. So, for example, the later in time the main costs for the formation of the energy system are made, the more favorable it is from the point of view of adaptation.

Thus, the adaptability of energy systems was previously based on the presence of large reserves of both production capacities and energy resources.

An analysis of studies devoted to the problems of ensuring the adaptability of energy systems at the present stage of development [160, 180, 186, 219, 223, 234, 252, 255, transportation of energy resources, the liberalization of electricity markets that took place in many countries of the world in the 1990s and 2000s, the introduction and wide distribution of small-scale generation, the process of further integration of national energy systems into the world energy industry, as well as the growth of political tension), have a significant impact on the factors that determine the adaptability of modern energy systems. At present, due to the changes in the operating conditions of energy systems, production and resource reserves, while remaining significant for ensuring the reliability of the operation of energy systems, have lost their role in ensuring their adaptability. Factors associated with sustainable energy are increasingly coming to the fore in improving the adaptability of energy systems:

- the level of diversification of the types of consumed energy resources (oil, gas, coal, renewable energy sources - RES);
- the level of diversification of the structure of generating capacities by type of power plants;

- the level of diversification of energy resource suppliers;
- growth of energy efficiency of production and, as a result, a decrease in the energy intensity of the economy;
- development of renewable energy sources;
- development of Smart Grids technologies (“Smart networks”);
- development of distributed generation.

All of the above factors, to one degree or another, affect the stress resistance of energy systems and their adaptability to changing conditions by creating a more flexible structure. For example, Smart grids technology based on the use of new information technologies makes it possible to transmit electricity more efficiently, restore power supply after accidents faster, reduce electricity generation costs, create integrated renewable energy systems, build smart homes, etc. Smart grids technologies create an opportunity for the emergence of "active consumers" in the electricity market. An active consumer of electricity is a consumer who independently makes decisions about the mode of his electricity consumption and has the opportunity to sell the excess electricity he generates. The emergence of an active consumer as an equal participant in the electricity market contributes to an increase in the level of adaptability of the energy system, since, by increasing the number of possible options for the system's response to ongoing changes, it makes it possible to smooth out peak loads, reduce the system reserve, optimize the operating modes of power plants and the electric power network, and reduce costs and losses. Multi-agent modeling systems effectively imitate the behavior of an active consumer and make it possible to assess the strength of its impact on the structure and operating conditions of local electric power systems.

Through the exchange of information between electricity producers and consumers, Smart Grids make it possible to automatically redirect the load in networks and, thereby, minimize the effects of power outages. Thus, this technology, reducing the importance of each individual element in the operation of the electric power system, allows it to respond more quickly and efficiently to changing external conditions [258, 278, 279, 349].



In a situation of high uncertainty and volatility of the conditions for the existence of the energy system, not only the costs of adaptation become important, but also the process of making a managerial decision. In particular, the faster the reaction to the ongoing changes is carried out, the more adaptive the controlled energy system, all other things being equal. And moreover, the more options for acceptable reactions exist, the more effective the choice of the option of reaction to the ongoing changes can be in terms of achieving the goals of the development of the energy system. In this regard, the level of adaptability of the energy system is determined not only by the amount of costs for its adaptation to external and internal changes, but also by the number of possible, accessible and effective options for the system's response to changes: the more possible, affordable and cost-effective options for the system's response to changes exists, the more adaptive it is, *ceteris paribus*. In this situation, the introduction of Smart Grids technology also contributes to an increase in the level of adaptability of energy systems.

The above list of factors affecting the level of adaptability of modern energy systems should be supplemented, in our opinion, by such a factor as the level of development of financial markets and the degree of access to them by companies in the energy sector. In case of high financial stability, additional adaptation costs can be covered by the energy companies' own funds. However, the more developed the financial markets, the higher the degree of access to them by energy sector companies and the more financial market instruments are available to them, the more opportunities they have to finance the additional costs of adapting the energy system.

Since modern energy systems are complex systems consisting of a large number of interconnected elements, another factor that ensures adaptability is the level of organization of interaction between companies in the energy sector and other participants in the energy market. The better the communication between the participants is organized, the faster the coordinated response to changing conditions will be carried out, and the lower the costs of adaptation measures will be, all other things being equal.

The above list of factors that form the adaptability of energy systems, and criteria for assessing the level of their adaptability, the author proposes to systematize in accordance with:

- their participation in the formation of the adaptability of the main structural elements of the energy system, belonging to different stages of the process of creating and consuming an energy resource (Table 2.5);
- forecasting horizon and the level of organization of the energy system.

Table 2.5 – Factors that form the adaptability of the structural elements of the energy system belonging to different stages of the process of creating and consuming an energy resource

Stages of the process of creating and consuming an energy resource	Factors that ensure the adaptability of the structural elements of the energy system at a certain stage of the process of creating and consuming an energy resource
Extraction of an energy resource	Availability of resource reserves; development of renewable energy sources; availability of advanced production technologies; production cost; commercial and production efficiency of companies in the extractive sector, etc.
Energy resource processing and energy conversion	The level of diversification of energy resource suppliers; the level of diversification of the types of consumed energy resources; stock of production and power generating capacities; the level of diversification of the structure of generating capacities by type of power plants; investment attractiveness of fuel and energy companies; the presence of competition in the energy market, etc.
Transportation / Transfer and distribution	Availability of organized markets for wholesale and retail trade in energy resources; developed transport network; low organizational and legal barriers for connecting new producers to electric networks; development of Smart Grids technologies; development of distributed generation, etc.

Source: compiled by the author

Previously, it was shown that the decisions made in the process of managing the adaptability of energy systems depend on the forecast horizon of their development. So in the short term, the main risk factors to which the energy system must adapt are:

- speculative fluctuations in supply and demand in energy markets;
- short-term fluctuations in a number of macroeconomic indicators (interest rate, exchange rate, inflation rate, etc.) that can affect the planned development of the energy system;

- technogenic accidents leading to a sharp increase in the need for one form or another of energy in a given territory;
- socio-political factors.

In the medium and long term, the level of adaptability of the energy system will be determined by the degree of its adaptation to such deviations as:

- long-term deterioration of the investment climate;
- stable trends of decreasing demand for certain energy resources;
- change in the pace of economic development of a country or region;
- tightening requirements for the parameters of the energy system development option (for example, in the context of changing environmental safety standards).

Figures 2.14–2.16 present the most significant factors in changing the conditions for the functioning of the energy system and the factors that ensure its adaptability, systematized depending on the forecasting horizon and the level of organization of the system (Figure 2.13).

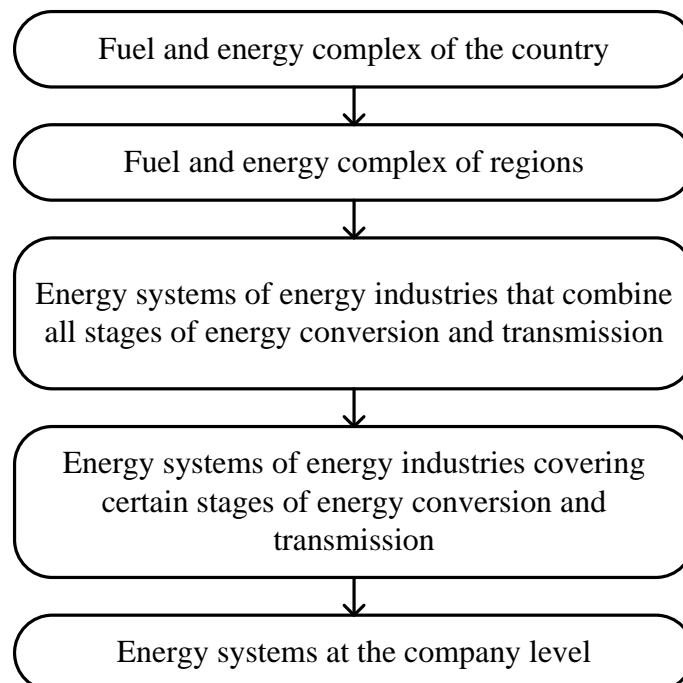


Figure 2.13 – Levels of organization of energy systems

Source: compiled by the author

It should be noted that the factors identified in Figures 2.14–2.16 always affect energy systems, and not only within the specified forecasting horizons and at the specified levels of organization of the energy system. However, these factors have a greater impact on the functioning of the system precisely at the identified levels of its organization and at the indicated forecasting horizons.

Forecast horizon	The most significant factors in changing the conditions for the functioning of the energy system	Factors that ensure the adaptability of the energy system
Short term	Short-term fluctuations in demand and prices for energy resources in specific energy markets; accidents and stoppages in production; changes in legislation; delay in financing investment projects by participants	Production reserves that allow the company's energy system to cover the surge in energy demand
Medium term	Steady trend of change in supply and demand for energy resources; fluctuations in interest rates; rising inflation	Investment attractiveness of investments in the development of the energy system; qualified management personnel; share of inertial elements in the structure of the energy system
Long term	Change in demand and price for the energy resource produced by the energy system; change in the structure of demand for energy resources on the part of the economy	

Figure 2.14 – The most significant factors in changing the conditions for the functioning of the energy system at the level of individual companies and the factors that ensure its adaptability, systematized depending on the forecast horizon

Source: compiled by the author

On the short-term horizon of forecasting the development of the energy systems of individual companies, production reserves play an important role, due to which a short-term shortage of energy resources can be covered. The high inertia of energy systems will not allow in the short term to cover the deficit by increasing production.

Forecast horizon	The most significant factors in changing the conditions for the functioning of the energy system	Factors that ensure the adaptability of the energy system
Short term	Short-term fluctuations in demand and prices for energy resources caused by political, climatic and other fluctuations	Balanced development of production potential at all stages of energy conversion and transmission; availability of production reserves at all stages of energy conversion and transmission
Medium term	Steady trend of change in supply and demand for energy resources; fluctuations in interest rates; reduction of costs for the extraction, transformation and transfer of alternative types of energy resources for the considered energy system	Investment attractiveness of energy sectors; competent state policy aimed at stimulating the development of energy production; reduction of costs for extraction, processing and transmission of energy resources
Long term	Change in demand and price for the energy resource produced by the energy system; change in the structure of demand for energy resources on the part of the economy	

Figure 2.15 – The most significant factors in changing the conditions for the operation of the energy system at the level of energy sectors and the factors that ensure its adaptability, systematized depending on the forecast horizon

Source: compiled by the author

The level of adaptability of the energy systems of the energy sectors, which combine all stages of energy conversion and transmission, largely depends on the balanced development of the production potential of all stages of production, conversion and transmission of energy resources.

Forecast horizon	The most significant factors in changing the conditions for the functioning of the energy system	Factors that ensure the adaptability of the energy system
Short term	Short-term fluctuations in demand and prices for energy resources caused by political, climatic and other fluctuations	Balanced development of production potential at all stages of energy conversion and transmission; availability of production reserves at all stages of energy conversion and transmission
Medium term	Systemic economic crises; the emergence of new technologies for the extraction, processing and transportation of energy resources; changing global energy flows; development of alternative types of energy; terms of international trade; tightening requirements for environmental safety	Improving the investment climate; development of related industries; governmental support
Long term		

Figure 2.16 – The most significant factors in changing the conditions for the functioning of the energy system at the level of the fuel and energy complex of the country and regions and the factors that ensure its adaptability, systematized depending on the forecast horizon

Source: compiled by the author

Identification of the factors that determine the level of adaptability of energy systems in modern conditions makes it possible to more effectively analyze the impact of stressful situations on the functioning of the energy system as a whole in order to develop strategic measures aimed at increasing the level of its adaptability.

Figures 2.14-2.16 show that one of the main factors in ensuring the long-term adaptability of energy systems at any level of organization is investment, which is a necessary source of external resources, without which any economic system will degrade, losing its adaptive properties. Without obtaining additional external resources, the energy system loses its production and economic efficiency, which is

accompanied by a decrease in its level of adaptability. This circumstance is due to the following factors:

1. Physical deterioration, leading to a decrease in the reliability of the energy system.
2. Obsolescence, which reduces the competitiveness of this energy system due to the advanced technological development of other energy systems.
3. The lag in the development of the energy system from the development of the economy of the region or the country as a whole.
4. Increasing competition in the energy market.

The growth of competition in the energy market at the initial stage may reduce the level of adaptability of the energy system. For example, in the period from 2003 to 2017, the volume of the world market for liquefied natural gas (from 130 billion m<sup>3</sup> to 393 billion m<sup>3</sup>) increased sharply, which was accompanied by an increase in the number of liquefaction plants and terminals for natural gas liquefaction. This circumstance significantly reduced the adaptability of gas energy systems based on the transmission of gas through a gas pipeline network, since the use of liquefied natural gas (LNG) technologies increased competition in international gas markets and increased the mobility of gas supplies in the world, which allowed both consumers and producers to respond sensitively fluctuations in supply and demand in various regional gas markets and redirect gas flows.

Energy companies that use only gas pipeline networks to transport energy resources are tied to certain regional markets and cannot use arbitrage deals if necessary. However, if the system is properly modernized in response to increased competition, the level of adaptability can recover or even increase. On fig. 2.17 shows a diagram of a successful system upgrade in response to increased competition in the energy market, leading to an increase in its level of adaptability.

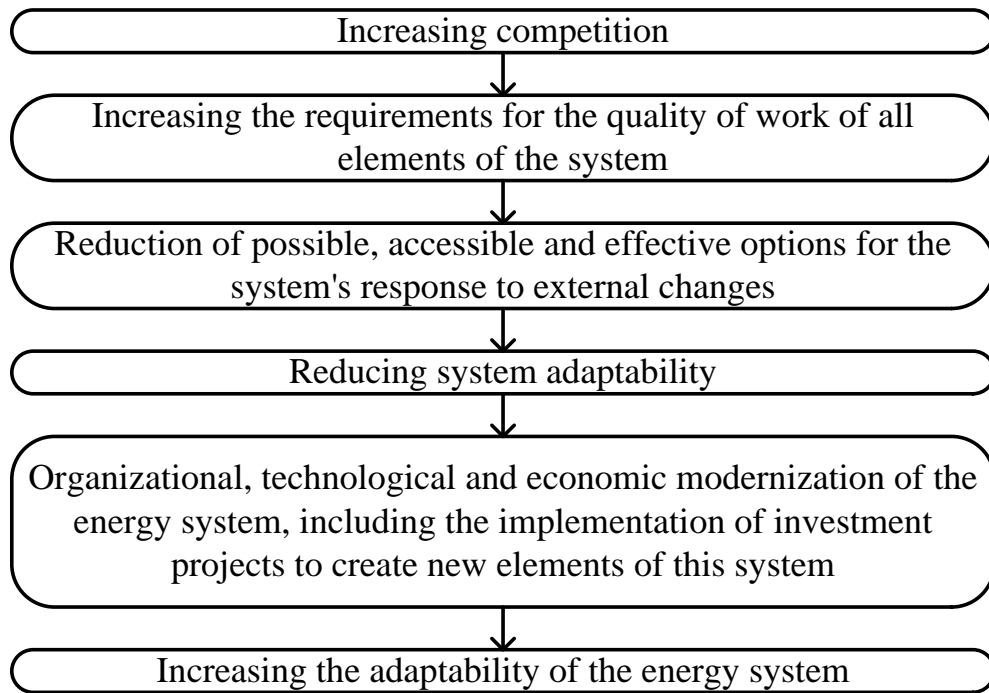


Figure 2.17 – The impact of growing competition in the energy markets on the level of adaptability of the system

Source: compiled by the author

Along with natural causes, social, political and economic factors (political bans, tougher legislation, reduced demand for energy resources, increased competition, growing public interest in renewable energy sources, etc.) can have a negative impact on the level of adaptability of the energy system over time.

An analysis of the changes taking place in the world energy and economy has shown that one of the ways to ensure the growth of the adaptive properties of the national energy system and solve the problems of ensuring the country's energy security is the development of sustainable energy in Russia. The development of energy production from renewable sources that accompanies the transition to sustainable energy, as well as the introduction of distributed small energy, will help the Russian energy sector to cope with the current problems of the Russian fuel and energy complex (low efficiency, moral and physical obsolescence of equipment, etc.) and increase sustainability and adaptability of the Russian energy system.

Expanding the use of renewable energy sources is a key element of sustainable energy. Unlike European countries that seek to diversify their energy sources, Russia does not need to increase the share of renewables in its energy mix. Although the



development of renewable energy can have a significant positive impact on the Russian economy through the creation of new jobs, technological development and increasing the competitiveness of its energy market, it can be argued that the Russian government does not have significant incentives for its development.

Currently, only three types of renewable energy sources are used for electricity generation in Russia - solar energy, wind energy and small hydropower, but their role in electricity generation is too small. The rates of commissioning of generating capacities using these energy sources are reflected in the government document on the problem of increasing energy efficiency in the electric power industry based on the use of renewable energy sources for the period up to 2035 (Table 2.6).

Table 2.6 – Annual commissioning of generating capacities according to government plans, MW

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Итого
Solar power plants	500	500	500	500	500	399	2 899
Wind farms	270	270	162,6	162,6	-	-	865,2
Small hydro power plants	49,8	16	24,9	33	23,8	41,8	210

Source: [3]

In 2021, the installed capacity of solar and wind power plants amounted to 3,616 MW, which accounted for 1.47% of the total installed capacity in the Unified Energy System of Russia. Renewable electricity generation accounted for 0.47% of total electricity generation in Russia in 2021.

Rapidly changing conditions for the functioning of energy systems, the emergence of new technologies for the production, transportation and transformation of energy resources, as well as the emergence and spread of technologies such as the Internet of Things and the creation of digital twins, lead to the emergence of new factors that affect the adaptability of energy systems and tools to improve them. adaptive properties. Identification, analysis and systematization of the factors that determine the level of adaptability of energy systems is a necessary step in the process of managing the adaptability of energy systems, which makes it possible to increase the validity and effectiveness of the state policy in the field of development

of the fuel and energy complex, thereby solving the problems of ensuring the energy security of the country.

**Chapter conclusions.** In the second chapter, based on the analysis of the works of domestic and foreign scientists, the features of such properties as flexibility, resilience and adaptability of complex systems were analyzed. The essence of energy systems adaptability was revealed. Such characteristics of adaptability as the amount of costs necessary to restore the effective functioning of the energy system and period of recovery were described.

The necessity to separate of static and dynamic adaptability was shown. Static adaptability is described as the ability of a system to return to a pre-crisis level of economic efficiency (productivity or other parameter) within an acceptable period of time. Dynamic adaptability (development adaptability) is the ability of the energy system to ensure susceptible of its development to environment changes. Which means dynamic of energy system development could be changed with accordance to new requirements.

It is shown that, unlike static adaptability, where the energy system is considered in the context of returning to the initial equilibrium state, the property of dynamic adaptability enables the system to find new equilibrium states in the process of its development. It is concluded that the difference between static and dynamic adaptability must be taken into account when choosing methods for assessing the current state and strategic plans for the energy systems development.

It was shown that the main way to reduce the negative consequences of the strategic threats to the energy security of the country is to increase the adaptive properties of the national energy system. Having revealed the essence of the energy system adaptability management process, it was shown that this process can be used as a tool to improve the efficiency and reliability of its functioning, as well as to ensure long-term energy security.

The goals and tools for managing the energy systems adaptability were considered. The level of permissible error of the initial data used in making strategic

management decisions in order to ensure long-term energy efficiency security were identified. The level of permissible error depends on the following factors:

- the planning period;
- goals of the state energy strategy;
- features of economic development;
- the level of adaptability of the energy system;
- the level of economic efficiency of energy companies and so on.

The permissible error should be minimal in the case of construction or modernization of specific elements of the functioning energy system with the aim to improve its efficiency and static adaptability. At the same time, high uncertainty in data is allowed when managers (or officials) deal with dynamic adaptability. In this case the dynamic characteristic of the energy system is more important than in what particular state this system will be in future.

In order to increase the validity of strategic planning for the development of the national energy system and ensure the energy security of the country, the factors that form the adaptability of energy systems were identified and analyzed. The factors are relevant for a whole energy system as well for its elements (or subsystems belonging to different stages of the process of creating and consuming an energy resource).

It was found that the fundamental changes taking place in the world energy industry (the emergence of new technologies for the production, conversion and transportation of energy resources; the liberalization of electricity markets; the introduction and widespread use of small-scale generation; the integration of national energy systems into the world energy industry, etc.) have a significant impact on factors that determine the energy systems adaptability. It was shown that the efficiency and adaptability of energy systems were previously based on the presence of large reserves of both production capacities and energy resources. Currently, production and resource reserves, while remaining significant for ensuring the reliability of the energy systems operation, have lost their priority in ensuring adaptability.

Factors associated with sustainable energy are increasingly coming to the fore in increasing the flexibility and adaptability of energy systems. These factors are diversification of the types of consumed energy resources; diversification of the structure of generating capacities by type of power plants; diversification of suppliers of energy resources; growth of energy efficiency of production and, as a result, a decrease in the energy intensity of the economy; development of renewable energy sources, etc.

## **CHAPTER 3. ASSESSMENT OF THE ENERGY SYSTEMS ADAPTABILITY**

### **3.1. Principles and criteria for the energy systems adaptability assessment**

An analysis of the scientific literature on the adaptability of energy systems has shown that methods for assessing the adaptability of energy systems are still at the development stage, which is due to a number of reasons such as the multidimensional nature of the concept of adaptability; uniqueness of energy systems; the dynamism and fundamental nature of the ongoing changes in the global energy sector; the presence of a large number of not only quantitative, but also qualitative indicators characterizing the adaptability of energy systems, the formalized assessment of which is a complex theoretical and practical task [103].

Despite the fact that research papers have appeared in recent years [215, 228, 275, 286, 301, 302], covering various aspects of the problem of analyzing the adaptability property, there is still no specific, generally recognized and universal methodology for assessing the level of adaptability of energy systems.

Highlighting certain aspects of adaptability, the authors offer different indicators that can be used to assess its level. Thus, H. Willis and K. Loa [355] give a list of indicators that they formed as a result of a detailed review of the available literature, characterizing the adaptability of energy systems. This list contains a fairly large number of disparate, diverse qualitative and quantitative, economic and technical indicators, the totality of which the authors divide into the following groups:

1. Indicators evaluating the initial state of the system (input): reserves of energy resources; transport capabilities of the energy system; capacity structure of the energy system, etc.

2. Indicators characterizing the system's ability to respond to stressful situations (capacities and capabilities): availability of agreed organizational procedures and technical equipment for emergency shutdown of affected elements of the energy system; level of concentration of suppliers of energy resources; the ratio of the maximum and minimum amount of energy that the system can supply; Information Security; physical security of energy facilities; the possibility of attracting imported

equipment; dependence on foreign manufacturers of power equipment; investment attractiveness of the system, etc.

3. Indicators characterizing the reliability of the system (performance): the number of emergencies per year; economic efficiency of the system; technical and technological efficiency of the system; the number of interruptions in the supply of energy to consumers; availability of emergency shutdown equipment, etc.

4. Indicators characterizing the results of adaptation (outcomes): social and commercial costs of reducing energy supplies; cost of undelivered energy; adaptation costs; volatility in electricity prices; damage to the environment; harm to public health; loss of power as a result of a stressful situation, etc.

Despite the rather large number of indicators that can be used in the analysis of the level of adaptability of energy systems given in the work under consideration, the authors do not propose any method for collapsing the entire set of indicators to obtain some final quantitative assessment. In addition, the classification proposed by H. Willis and K. Loa [355] seems inconvenient, since many indicators can be assigned to several groups at once, and, moreover, have an indirect relationship to the adaptability of energy systems (such as indicators of information and physical the security of energy systems, which reflect the reliability of operation rather than the ability to adapt). At the same time, the presented classification does not reflect the stage of development of a stressful situation and further adaptation of the system to it.

In order to create an algorithm for assessing the adaptability of energy systems, we propose to systematize the existing indicators of adaptability in accordance with the stages of the adaptation process described by P. Roger (Table 3.1). According to P. Roger, the adaptation process includes four stages [323]:

1. Preparation / Planning. Forecasting stressful situations and developing possible measures aimed at stabilizing the system.

2. Responding. The first reaction of the system to the occurrence of a stressful situation, as well as ensuring the functioning of the energy system in the organizational and / or technical separation of the affected elements.

3. Recovery. Restoration of the functioning of all elements of the system.

4. Adaptation. Carrying out adaptation measures aimed at maximizing the efficiency of the energy system in the new conditions.

Table 3.1 – Correspondence of different groups of energy system adaptability indicators to the stages of the adaptation process

Stages of the adaptation process	Groups of energy system adaptability indicators
Preparation / Planning	Indicators characterizing the period of time between significant stressful situations of different nature; indicators characterizing the technical condition of the energy system
Response	Indicators characterizing the strength of the impact of an adverse event on the functioning of the energy system
Recovery	Indicators of structural, organizational and technical changes in the operation of the energy system necessary to restore its efficiency
Adaptation	Indicators characterizing the investment attractiveness of the energy system

Source: compiled by the author

Table 3.1 shows that at the first stage of the adaptation process - the preparatory stage - the adaptability of the energy system can be assessed using indicators characterizing the period of time between significant stressful situations of a different nature, and indicators characterizing the technical condition of the energy system. To estimate the time period between various kinds of significant stressful situations, the report of the European Electricity Producers Association [321] suggests using the indicator of the level of adaptability of the energy system  $R(t)$ , based on the use of the system operation time without loss of efficiency (MTBF, mean time between fails).

$$R(t) = e^{\frac{-t}{MBTF}} \quad (3.1)$$

Where:  $t$  – considered period of system operation.

$R(t)$  characterizes the degree of reliability of the system functioning. The higher the value of this indicator, the longer the period of decline in efficiency.

The technical condition of the considered energy system can be described by such indicators as the power structure of the energy system, the reserve of production capacities, the throughput of the transport network, the efficiency of power plants, the accident rate of the equipment used, the degree of wear of the equipment used, the

cost of energy produced, the level of concentration of suppliers of energy resources and others

The level of adaptability of the energy system at the stage of its response to a stressful event that has occurred can be assessed on the basis of indicators that characterize the strength of the impact of an adverse event on the functioning of the energy system: the degree of reduction in the supply of energy resources as a result of a stressful situation; the period of time required to fully restore the system; financial losses of energy companies as a result of a stressful situation; the maximum value of a negative change in the analyzed factors that can lead to a complete shutdown of the energy system, etc.

The level of adaptability of the energy system at the stage of its recovery after the implementation of a stressful situation can be assessed using indicators of structural, organizational and technical changes in the operation of the energy system necessary to restore the efficiency of its functioning: the index of growth in production capacities, the index of growth in the efficiency of power plants, the index of changes in production costs energy, the index of changes in transport costs, etc. These indicators characterize the ability of the system to change in a stressful situation.

Directly, the ability of the energy system to adapt to the changes in the conditions of its functioning is largely determined by its investment attractiveness. Indicators of the investment attractiveness of the energy system determine the amount of investment that can be attracted for its development or transformation, if necessary: the level of profitability of energy companies included in the energy system; the level of risk in the operation of energy companies; volume of investments required for adaptation measures, etc.

An analysis of the factors that form the adaptive properties of energy systems and the indicators used to assess adaptability made it possible to identify the following methodological principles for assessing the level of adaptability of energy systems:



1. In the process of analyzing the adaptability of the system, all stages of the adaptation process should be considered: from preparation and planning to adaptation.

2. When developing adaptation measures, it is necessary to take into account the interests of different participants in the process of energy production and consumption, including an assessment of the impact of probable stressful situations on the functioning of energy companies and the impact of a complete cessation or reduction in the supply of energy resources on the economy.

3. When predicting stressful situations and developing possible measures aimed at stabilizing the system, it is necessary to analyze the duration of time lags between stressful situations, as well as analyze the recovery time of the system after a stressful situation. In addition, it must be taken into account that a set of effective measures aimed at overcoming the consequences of a stressful situation will change over time due to changes in the energy system itself.

4. When developing possible measures aimed at stabilizing the operation of the system, it is necessary to carry out an economic assessment of the costs of adaptation measures.

5. Analysis of the adaptability of the energy system should include an assessment of the system's ability to attract resources necessary for the adaptation process from outside.

Given the need to distinguish between static and dynamic adaptability in order to make managerial decisions in the energy sector, the assessment of the adaptive properties of options for the development of the energy system, carried out in the context of ensuring the country's long-term energy security, should be carried out in accordance with the following principles for assessing the dynamic adaptability of the national energy system:

1. Assessment of the level of dynamic adaptability of the national energy system should be carried out taking into account the inertial properties of the system.

2. The most important assessed characteristic of the option for the development of the national energy system is not a possible abrupt increase in demand for energy resources from the economy, but a long-term positive change in its dynamics.

3. The assessment of the investment potential of the energy sector, that is, the need for capital investment and the investment attractiveness of the energy sector, becomes one of the key areas of analysis.

4. Adaptive measures should be of a preventive nature, that is, the development and implementation of adaptive measures should be carried out not after the implementation of an adverse event, but before it. Since strategic threats to energy security develop slowly over time and are systemic in nature, the main task of the strategic management of the national energy system is to identify these threats and adjust the current direction of development of the national energy.

Based on the analysis of the available indicators of adaptability, the identified stages of the adaptation process and the proposed principles for its assessment, the following algorithm for assessing the level of adaptability of the energy system can be proposed (Fig. 3.1).

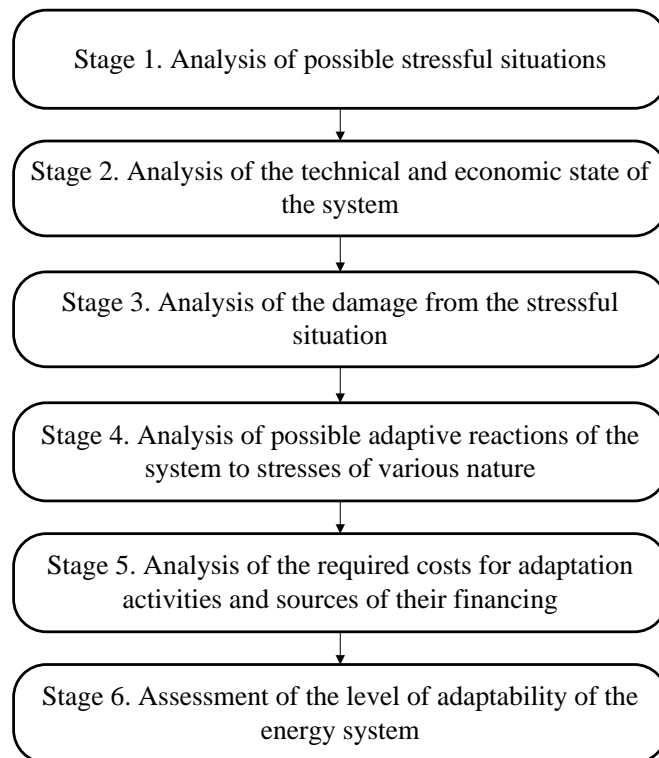


Figure 3.1 – Algorithm for assessing the level of adaptability of the energy system

Source: compiled by the author

At the first stage, an analysis of possible stressful situations is carried out. In the process of analysis, a set of stressful situations that threaten the analyzed system and their nature are determined, and the regularity of the occurrence of stressful situations is also assessed.

Depending on the technical and organizational features, the energy system can be more adaptive to stresses of one nature and less adaptive to stresses of another nature. Therefore, at the first stage of the analysis, it is necessary to classify stressful situations according to the nature of their occurrence and evaluate the adaptability of the system to different stress groups in order to identify its "weak" and "strong" sides. Depending on the sources of occurrence, stressful events can be grouped into the following four groups:

1. Production stressful situations associated with production shutdowns and accidents, the emergence of new technologies for the extraction, processing and transportation of energy resources, etc.

2. Financial and investment stressful situations associated with the deterioration of the conditions for attracting investment and credit resources, adverse currency fluctuations, rising inflation, increased tax payments, etc.

3. Market stress situations associated with increased competition, worsening terms of trade, changes in prices for energy resources, unfavorable sharp or gradual changes in demand, deterioration in the terms of international trade, etc.

4. Socio-political stressful situations associated with the growth of political tension between countries, the tightening of environmental requirements for energy facilities, etc.

According to the speed of manifestation, stressful situations can be classified into:

- short-term (rapidly manifesting stressful situations, most often associated with natural disasters, accidents and other interruptions in work);
- long-term (stressful situations that occur over a long period of time and are difficult to identify at the beginning of the process; as a rule, these are systemic

changes relating to one or another aspect of the political, social or economic life of the state).

Depending on the possibility of predicting stressful events are divided into: predictable; unpredictable.

Predictable stressful events include events that have already occurred in the past and for which statistical data can be used to predict. Unpredictable stressful events include events that are extremely rare, or events that never happened at all, and that are extremely difficult to predict in the future. The category of unpredictable events also includes events known under the term "black swan", introduced by N. Taleb [337]. These events - unique, unpredictable and having a fundamental impact on the conditions of the functioning of systems, should not be overlooked when considering the adaptability of large energy systems.

At the second stage of assessing the adaptability of the energy system, an analysis of the current technical and economic state of the system is carried out. At this stage, the technical and financial reserves of energy companies that are part of the analyzed system are evaluated; production and economic efficiency of the system; technical characteristics of key elements of the energy system (for example, power generators, power lines, throughput of transport networks), etc. This stage is necessary in order to assess the consequences of the implementation of a particular stress situation for the system.

At the third stage, the strength of the impact of stressful situations on the system is assessed. This stage seems to be one of the most difficult stages, since it is necessary to predict how a stressful situation will affect the operation of the energy system, how much its productivity and economic efficiency will fall, how much and for what period the supply of energy resources to consumers will decrease.

When assessing the level of adaptability of national energy systems at this stage, it is necessary to analyze the impact of the state of regional energy systems on the level of adaptability of the country's fuel and energy complex. The degree of integration of the regional energy system into the energy sector of the country plays an important role here. On a larger scale, two degrees of integration of the regional

energy system into the country's fuel and energy complex can be distinguished: a medium degree of integration and a high degree of integration. The average degree of integration is characterized by the presence of technologically isolated energy systems in the region, as well as a low turnover of energy resources with other regions of the country. In the case of medium integration, the level of adaptability of the region's energy system is taken into account when assessing the adaptability of the country's fuel and energy complex as an additive factor that cannot act as a determining factor in the assessment process. So, for example, a situation is possible when the regional energy system, due to the insufficient availability of power reserves of energy production, the high level of depreciation of the main equipment, etc. can be characterized as non-adaptive, while the country's energy system can be quite adaptive.

A high degree of integration is characterized by the presence of technical and technological ties of the regional energy system with other regions of the country, as well as a large volume of energy resources turnover, when the region acts as a supplier of energy resources or a large consumer of them. The energy system of regions with a high degree of integration has a significant impact on the adaptability of the country's fuel and energy complex at a qualitative level.

At the fourth stage, possible adaptive reactions of the system are analyzed. Adaptation measures are designed to reduce the stress of some event. However, unlike anti-crisis measures that return the energy system to the zone of normal functioning, adaptation measures are designed to technically and/or organizationally change the system so that it functions effectively in the new conditions. At the same time, it is assumed that to offset the negative impact of a stressful situation, the mechanisms for restoring the system itself (manifestations of the stability property of the system) are not enough. Therefore, when analyzing the level of adaptability of the energy system, possible managerial reactions that transform the system to one degree or another should be worked out.

At the fifth stage, the costs of adaptation measures and the sources of their financing are estimated. Adaptation measures can be accompanied by significant

financial costs, therefore, on the one hand, it is necessary to carefully assess the amount of resources needed for systemic transformations, and on the other hand, to analyze the sources of their financing. Since certain managerial decisions aimed at adapting to stressful situations can be implemented at different speeds and require greater or lesser costs, it is at this stage that the question of a cost-effective set of possible responses to stressful situations should be resolved.

At the sixth stage, the level of adaptability of the energy system as a whole is assessed. It should be taken into account that the forecasting horizon under consideration (medium-term or long-term) will influence the conclusion about the level of adaptability of the energy system. With a medium-term forecasting horizon, the current state of the system and its possible reactions to stressful situations are assessed through the implementation of adaptation measures. With a long-term forecasting horizon, not only rapidly manifesting stressful situations are analyzed, but also those that appear gradually, to which the energy system can respond with long-term transformations associated with structural changes.

Processes and events that in the long term can have an adverse effect on the energy system and therefore are stressors for it, can have both internal (due to internal contradictions and imbalances in the work of the energy system under consideration) and external (due to the interaction of the system under consideration with other systems) origin. The analysis carried out showed that the Russian energy system in the long term is more threatened by internal stressors. Therefore, as the main indicators for assessing the long-term adaptability of the national energy system, it is proposed to use indicators based not on an assessment of the time to restore energy supply, but on an assessment of the time and costs of structural changes in the national energy system necessary to establish energy supplies in an amount sufficient for the current functioning of the economic and social sphere and to ensure their growth and development. In this case, when solving the problems of ensuring energy security, such parameters as inertia and investment attractiveness become targets. The first criterion characterizes the time required for transformational structural changes, the second - the financial feasibility of the necessary structural changes.

Since there is no single set of indicators that would meet all the needs of assessing the level of adaptability of energy systems, the developed algorithm for assessing adaptability is a methodological basis for choosing a system of indicators for each specific case, which differs in the size of the energy system under consideration, forecast horizon, technical and economic features such as operating environment, and the energy system under consideration. The features of the proposed approach to assessing adaptability are that it covers all stages of the adaptation process, is based on the identified principles for assessing the adaptability of energy systems, and also takes into account not only market and production, but also financial, economic and socio-political stressful events.

### **3.2. Assessment of adaptability of alternative options for the energy systems' long-term development**

The fuel and energy complex (FEC) has a number of features that distinguish this sector of the economy from other industries. First, the fuel and energy complex, which meets the needs of the economy in fuel and energy, has remained a key sector since the beginning of the industrial revolution, the role of which in ensuring economic security is only growing. Secondly, the fuel and energy complex is an inertial industry, the development of which in the direction necessary for the country can take more than a dozen years, which leads to the need for early development and implementation of strategic development plans. Thirdly, due to the great importance of energy for the social, economic and military security of the country, systemic crises in the fuel and energy complex have huge consequences, and therefore the governments of countries cannot completely let go of control over the industry in the hope of its self-regulation thanks to the free market. Fourth, the fuel and energy complex has a significant adverse impact on the environment, which cannot be reduced through market mechanisms. Fifth, the beginning of the 21st century showed that energy resources are an important geopolitical tool that, on the one hand, can cause international conflicts, and on the other hand, can be used as a tool to influence international counterparties.

In this regard, the role of forecasting and strategic planning of energy development is difficult to overestimate. Therefore, methods and models of forecasting, strategic planning, development of tools for managing the development of energy systems, etc. continue to be actively developed in the world. The development of methods and models is carried out both in the direction of taking into account technical, economic and social changes in the world, and in the direction of taking into account new results in economic and technical sciences in order to obtain better and more reasonable management decisions designed to increase the efficiency and safety of the national energy system. Under these conditions, the development of a method for assessing the adaptability property in the analysis of alternative options for the development of the energy system is a task that is relevant not only in the framework of solving the problem of ensuring the energy security of the country, but also in order to improve the quality of public administration of the economy in general and energy in particular.

The criterion of adaptability of options for the development of the national energy system can and should be used in the analysis of options for the development of the fuel and energy complex, since in modern conditions of increasing uncertainty and the importance of solving the problems of ensuring the long-term energy security of the country, adaptability is a key property of large energy systems, providing the ability to "change" the option to changing needs economy in energy resources, and therefore acting as a basic element of ensuring long-term energy security of economic development.

The option for the development of the national energy system is a strategic plan for the development of the energy industry, affecting and determining in the long term such characteristics and parameters as:

- structure of generating facilities by type of power plants;
- size and dynamics of commissioning of generating capacities;
- volume of hydrocarbon production;
- dynamics of development of new fields;
- costs for the construction of industrial infrastructure;



- the amount of investment required to implement the chosen strategy;
- tools of state incentives for energy companies, etc.

The entire set of parameters for each specific option (strategy) for the development of the energy sector is determined based on the accepted scenario for the development of the national and world economy. On fig. 3.2 shows a diagram of the process of forecasting the demand and prices for energy resources, which are the basic parameters for developing an energy strategy.

Despite the complexity and multifactorial nature of each strategy, from the point of view of solving the problems of ensuring energy security, each available option has the following basic parameters:

- dynamics of energy prices;
- the magnitude and dynamics of demand for energy resources;
- the magnitude and dynamics of the commissioning of new production capacities necessary to cover the energy demand;
- required amount of investment.

The development strategy of the national energy system should focus on ensuring the energy security of the country when the demand for energy resources is satisfied by the operation of the national energy system at market prices. The optimal situation is when the dynamics of the development of the national economy corresponds to the dynamics of the development of the national energy sector. The task is to develop such a strategic plan for the development of the fuel and energy complex, which, on the one hand, will ensure sufficient energy development compared to the development of the economy, and on the other hand, will not create an excess of production capacity in the energy sector that reduces its economic efficiency.

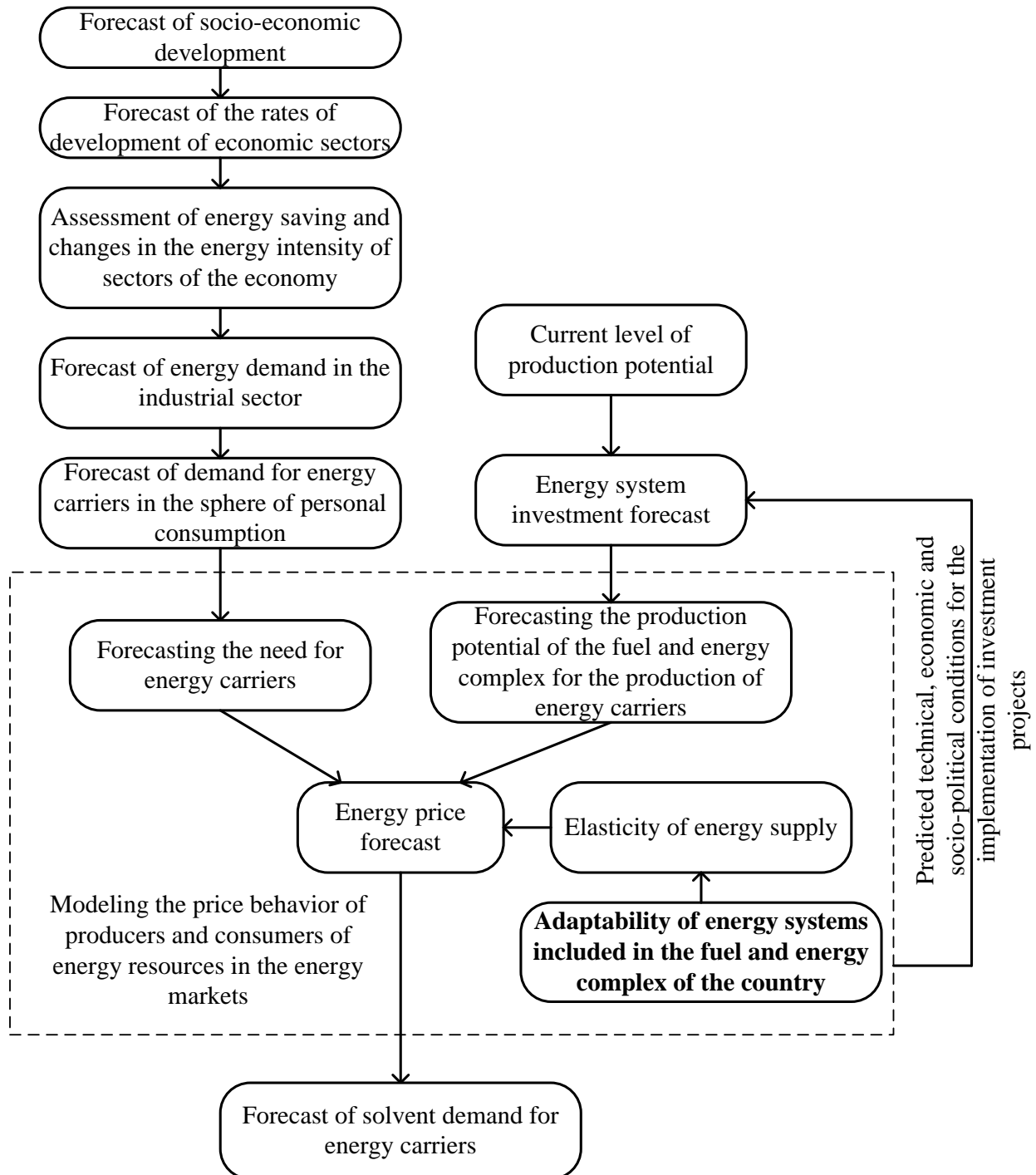


Figure 3.2 – Scheme of the process of forecasting demand and prices for energy resources, highlighting in it the assessment of the adaptability of the energy system

Source: compiled by the author

Part of the strategy for the development of the national energy system is the development and implementation of the state investment policy in the energy sector, aimed at commissioning new and updating existing power generating capacities. The choice of a method for assessing the effectiveness of investments as a whole depends

on many factors: the period of investment, the form of investment, the nature of the uncertainty of the initial data (probabilistic, interval, probabilistic-interval), the number and nature of participants (public and private investments), etc. For energy, except of the above factors, a special role in the formation of criterion performance indicators and the choice of methods for making managerial decisions is played by the level of the hierarchy, which includes the developed investment projects, programs and strategies.

There are differences in approaches to the evaluation of investment projects, programs and strategies related to different hierarchical levels of the organization of the national energy system (Fig. 3.3).

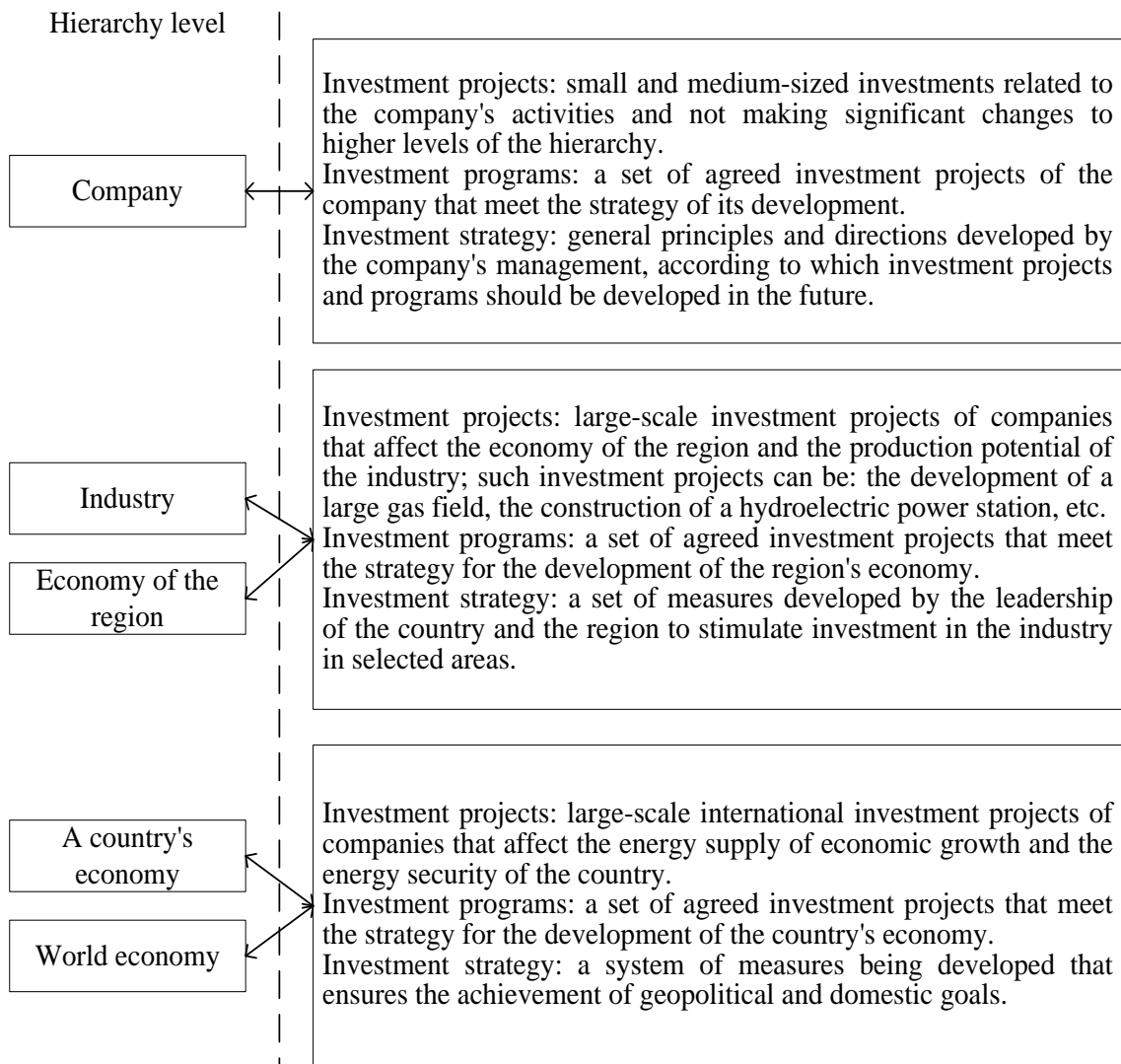


Figure 3.3 – Characteristics of investment projects, programs and strategies depending on the hierarchical level to which they belong

Source: compiled by the author

Depending on which hierarchical level the investments belong to, different performance criteria will be decisive in the evaluation process. In addition to belonging to one or another level of the hierarchy, the methods of evaluation and decision-making will differ depending on whether the investment options under consideration are investment projects, investment programs or investment strategies.

As can be seen from Table 3.2, with an increase in the hierarchical level, priority performance indicators change. If, at the company level, the criterion indicator is, for example, net present value (NPV), which can be easily quantified, then already at the level of the regional economy, the efficiency indicators can be the development of the region's infrastructure and the growth of energy security, which in turn represent a number of not only quantitative, but also quality features.

Table 3.2 - Criteria for the effectiveness of investment projects, programs and strategies

Hierarchy level	Performance criteria	
	Investment project and program	Investment strategy
Company	Net present value (NPV); standard deviation NPV	Market capitalization of the company; return on assets and equity
Industry	The volume of cumulative generation in the industry by types of fuel and energy; depreciation level of the main equipment	Technological re-equipment of production
Economy of the region	Job growth; increase in the regional budget; infrastructure development	Development of the infrastructure of the region; energy supply of the region's economy
A country's economy	Ensuring the economic growth of the country with an energy resource; high level of environmental safety; high level of energy security; reducing the energy intensity of the economy; increasing the efficiency of using energy resources	
World economy	Geopolitical position of the state; energy security of the country; fulfillment of international obligations	

Source: compiled by the author

With an increase in the hierarchical level, the number of criteria by which efficiency can be assessed also increases. This is due to the fact that the higher the affected hierarchical level, the greater the number of participants with their own

special interests must be considered in the evaluation process, and the very concept of effectiveness begins to include not only commercial attractiveness, but also socio-political significance.

When developing, within the framework of the state policy for the development of the national energy system, a strategy for commissioning electric generating capacities, a balance must be found between its riskiness (that is, the likelihood that, due to the outstripping development of the economy compared to the energy sector, the national energy system will be unable to fully satisfy the demand for energy resources) and efficiency, characterized by the absence of excessive investments in the energy sector (Fig. 3.4).

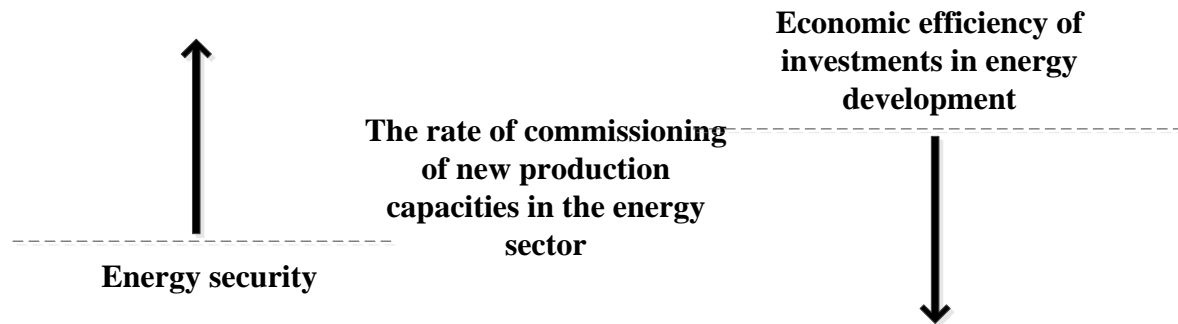


Figure 3.4 – Balance between riskiness and efficiency of the strategy for commissioning new power generating capacities

Source: compiled by the author

To develop a strategy for commissioning new power generating capacities, it is proposed to use the following method for assessing the risks of implementing the state sectoral policy in the field of energy [100]. If the growth in actual demand for electricity over the planned period turns out to be greater than the increase in electricity generation capacity provided for by the strategic plan, then in order to satisfy the conditionally excess demand  $\Delta D$ , it will be necessary to make additional investments  $\Delta I$ , which are the costs of adapting the strategic plan to actual conditions.

$$\Delta D = D_f - D_p \quad (3.2)$$

$$\Delta I = I_f - I_p \quad (3.3)$$

where  $D_f$ ,  $D_p$  – actual and planned volume of demand from the economy for energy resources, respectively, toe;

$I_f$ ,  $I_p$  – actual and planned volume of investments, respectively, mln.

The projected volume of demand for energy resources and the volume of investments required for the corresponding development of the energy system are determined not for each year under consideration, but in total for the entire analyzed period. If the need for energy resources is predicted by discrete values over the years, then the value of the total demand is found by the formula:

$$D_p = \sum_{i=0}^n D_{pi} \quad (3.4)$$

If the dynamics of demand is given by a continuous function, then the value of the total demand is found by the formula:

$$D_p = \int_0^n f(D_p) dD_p \quad (3.5)$$

where  $n$  – forecasting horizon (years).

The total volume of investments is calculated in a similar way.

The duration of the period under consideration (forecast horizon) may vary, but its optimal value should be in the region of 10–15 years, since with a larger value, the uncertainty of the future becomes so high that the influence of the predicted values on current management decisions within the considered energy development options becomes insignificant.

Due to the predictive nature of the magnitude of future demand for energy resources, the total volume of demand for electricity in the process of strategic planning for the development of the electric power industry should be represented by an interval of possible values with an appropriate probability distribution. On fig. 3.5 shows the probability distribution function of the total demand for energy resources for the period from 0 to  $n$  years.

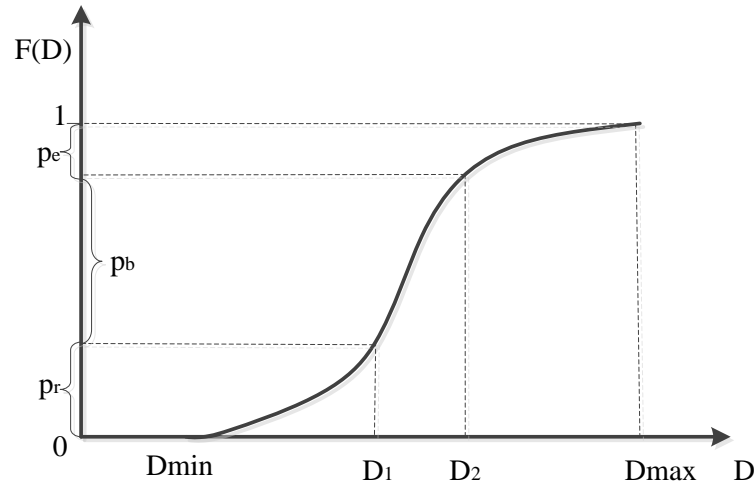


Figure 3.5 – The probability distribution function of the total demand for energy resources

Source: compiled by the author

On fig. 3.5  $D_{min}$  и  $D_{max}$  mean the minimum and maximum predicted value of the total demand for electricity in the considered period of time.  $[D_1; D_2]$  – the most probable range of values of the actual value of the total demand for energy resources, the probability of falling into which is  $p_b$ .

In the case of high uncertainty of the future development of the national and world economy, the forecast volume of demand can be set by the range of values  $[D_{min}; D_{max}]$  with a uniform probability distribution (Fig. 3.6).

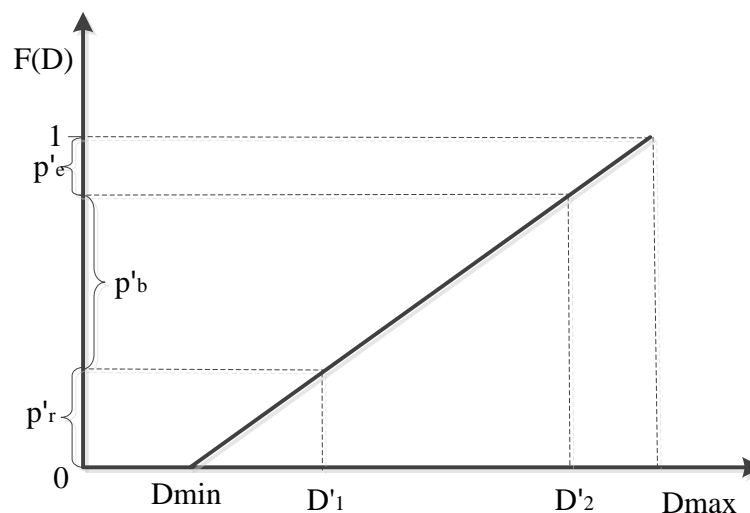


Figure 3.6 – The probability distribution function of the value of the total demand for energy resources under the conditions of interval uncertainty of the initial data

Source: compiled by the author

When forming a strategy for the development of the electric power industry, the initial base for constructing options can be either a given interval of demand  $[D_1; D_2]$  or the value of the probability of falling into the interval  $p_b$ . The nature of the probability distribution of the predicted demand leads to the following dependencies.

1. Equal intervals of forecasted demand correspond to different values of the probability of actual demand hitting them:

$$\begin{aligned} [D'_1; D'_2] &= [D_1; D_2] \\ p'_b &< p_b \end{aligned} \quad (3.6)$$

2. Equal probability values lead to different forecast demand intervals:

$$\begin{aligned} [D'_1; D'_2] &> [D_1; D_2] \\ p'_b &= p_b \end{aligned} \quad (3.7)$$

where  $p_b$  and  $p'_b$  – the probabilities that actual demand will fall within the intervals  $[D_1; D_2]$  and  $[D'_1; D'_2]$ , accepted in the energy system development strategy as basic options for normal and interval probability distributions, respectively.

Different variants of the energy development strategy can be developed both for one interval of the forecasted demand for energy resources, and for different intervals (Fig. 3.7).

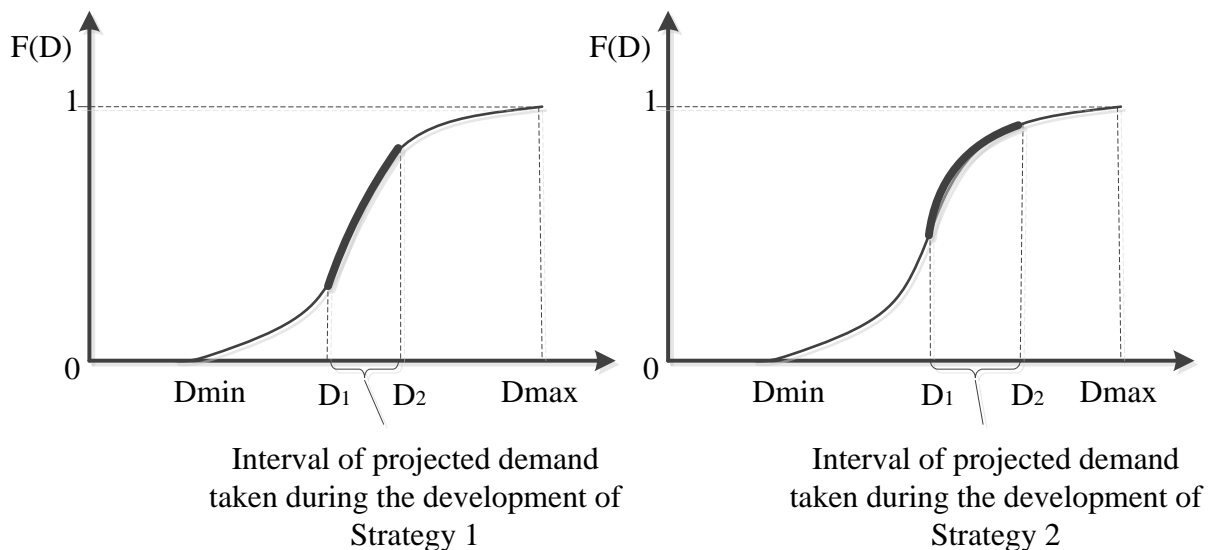


Figure 3.7 – Intervals of ranges of demand values taken in the development of different options for energy strategies

Source: compiled by the author



The energy resource demand distribution function  $F(D)$  will be the same for all energy development options, since it is based not on the development options themselves, but on the methods of forecasting the demand for energy resources. In other words, at first, with the help of various methods and models, the dynamics of demand is predicted, and then, on its basis, various alternative options for the strategic development of the national energy system are developed. At the same time, if some variants of the energy development strategy are developed on the basis of one forecast of the dynamics of demand for energy resources, and other strategies are developed on the basis of a different forecast, these options will not be comparable.

In modern conditions, the main characteristic of the sustainability and riskiness of the development of energy systems is the property of adaptability. In this case, the coefficient of adaptability of the system to an unfavorable change in the initial parameters can be used as the initial formula for analyzing the riskiness of the development option of the energy system [160]:

$$I_a = \frac{E}{C_{ad}} \quad (3.8)$$

where  $E$  – systemic consequences from some stressful event;

$C_{ad}$  – costs of adaptive measures aimed at restoring the efficiency of the system.

$I_a$  characterizes the volume of unfavorable changes in the basic parameters, which can be offset by a unit of adaptation costs. The higher the value of the indicator, the more adaptive the system is to this type of stress.

The basic formula of the energy system adaptability indicator  $I_a$  is used to assess a certain event and does not take into account the probabilistic nature of events. In the case of assessing the long-term (dynamic) adaptability of options for the development of energy systems, the adaptability indicator should take into account the probability of an adverse event. Under conditions of high uncertainty of the future, the amount of adaptation costs that level the consequences of adverse events can be defined as a risk, and since the risk is the product of the probability of an adverse event and the

amount of damage from its occurrence, the adaptability indicator of the system can be represented as follows:

$$I_a = \frac{E}{C_{ad} \cdot p} \quad (3.9)$$

where  $p$  – the likelihood of some adverse event occurring.

The higher the value of the  $I_a$  index, the more effective the adaptation measures.

The modified indicator  $I_a$  can be used to assess the adaptive properties of the developing energy system not only in the case of one unfavorable change in the operating conditions, but also in the case of an unfavorable change in the aggregate conditions for the implementation of one or another variant of the system development. It should be noted that the denominator of the index  $I_a$  characterizes the total level of risk inherent in the considered variant of the system development. Then the risk can be estimated by the formula:

$$R = \sum_{i=0}^n C_{adi} p_i \quad (3.10)$$

where  $p_i$  – probability of occurrence of the  $i$ -th event.

Since a central place in the development and implementation of the strategy for the development of the national energy system is the assessment of the dynamics of demand and investment in the energy sector required for the corresponding development of production potential, the risk of implementing the energy system development option lies in the discrepancy between the planned introduction of generating capacities to the growing needs of the economy. Since a specific option for the development of the energy sector is developed under a specific scenario for the development of the economy with the corresponding dynamics of demand for energy resources, there are three possible outcomes for the implementation of the energy strategy:

1. Actual demand is equal to planned, which corresponds to the successful implementation of the energy strategy.

2. The actual demand for energy resources will be higher than planned, then additional adaptation costs will be required in the form of investments in the construction of new generating capacities.

3. The actual demand for energy resources will turn out to be lower than planned, then part of the actual investments made in the construction of new generating capacities will turn out to be economically inefficient.

Given the uncertainty of the future, each option for the development of the energy sector can be described by a number of coefficients that assess the riskiness and adaptability of the development option. As an initial formula for analyzing the riskiness of a development option for an energy system, the above-considered modified system adaptability coefficient to an unfavorable change in the initial parameters  $I_a$  can be used. Для оценки адаптивных свойств анализируемого варианта развития энергетической системы может быть использован показатель  $I_e$ .

$$I_e = \frac{\Delta D_e}{\sum_{i=0}^n \frac{\Delta I_i}{(1+r)^i} \cdot p_e} \quad (3.11)$$

where  $\Delta D_e$  – the difference between the maximum and minimum value from the interval  $[D_2; D_{max}]$ ;

$\Delta I_i$  – the volume of adaptation investments made in the  $i$ -th period;

$p_e$  – the probability that the actual value of demand falls within the interval  $[D_2; D_{max}]$ .

Since the coefficient  $I_e$  determines the level of cost effectiveness for adaptive measures in case the actual volume of demand for energy resources exceeds the planned one, the larger its value, the more adaptive and efficient the option. That is, the higher the level of adaptability of the variant, the less costly it can be “adjusted” to the new conditions for the functioning of the energy system, and the lower the risks of implementing this variant of the strategy.

To assess the risk of falling demand for energy resources with the subsequent emergence of excess production capacity in the energy sector, the indicator  $I_r$ .

$$I_r = \frac{\Delta D_r}{\sum_{i=0}^n \Delta I_i (1+r)^{n-i} \cdot p_r} \quad (3.12)$$

where  $\Delta D_r$  – the difference between the maximum and minimum value from the interval  $[D_{min}; D_l]$ ;

$p_r$  – the probability that the actual value of demand falls within the interval  $[D_{min}; D_l]$ ;

$\Delta I_i$  – surplus of investments made in the  $i$ -th period.

The higher the value of this indicator, the less sensitive the variant to a drop in demand in terms of the manifestation of excessive investment. Since a decrease in actual demand compared to planned leads to excess investment, when analyzing the  $I_r$  index, it is necessary to take into account the amount of lost profit from inefficient investments.

The integral indicator of the efficiency and riskiness of the energy development option can be obtained using the additive convolution of the criteria:

$$I_{ad} = l_e I_e + l_r I_r \quad (3.13)$$

$$l_e + l_r = 1 \quad (3.14)$$

The values of the weight coefficients  $l_e$  and  $l_r$  are determined depending on the priorities of the subject of assessment. If priority is given to ensuring the energy security of the country, then the values can be as follows:

$$l_e = 0,7; \quad l_r = 0,3$$

If priority is given to the investment efficiency of the energy system development option, i.e. there should be no overinvestment, then the values of the weight coefficients can be as follows:

$$l_e = 0,3; \quad l_r = 0,7$$

Since the return on additional investment may vary depending on the volume and structure of power generation capacities, the production efficiency of investments within the most likely range of demand values assumed in the formation of the strategy may be higher than with additional investments in adaptation measures. There can be several reasons for uneven returns on investment. First, the operation of

the law of diminishing marginal return on investment, other things being equal, described by the curve in Fig. 3.8.

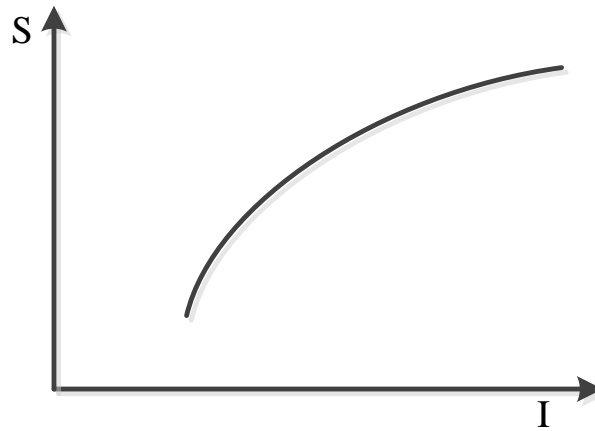


Figure 3.8 – Dependence of the production potential of the energy system (S) on investments (I)

Source: compiled by the author

If we consider the energy development strategy as a set of separate investment projects, then it is obvious that for the basic strategy the most efficient industrial facilities will be accepted for launch, while additional investments will be made in projects that are the last in terms of efficiency.

Secondly, the structure and type of production capacities introduced to meet the demand for energy resources will have a strong impact on the production return on investment. Table 3.3 shows data on the average investment for the construction of 1 kW of power. Table 3.3 shows that a strategy that prioritizes the development of traditional energy sources will make more cost-effective investments than a strategy based on renewable energy sources. Therefore, the return on investment within the framework of the implementation of the strategy and within the framework of additional adaptation investments will differ among other things in the case of different types of plants introduced to meet the demand for energy resources.

Table 3.3 – Specific investments in power plants of various types on average around the world (USD / kW)

Power plant type	Minimum	Average	Maximum
Gas power plants	627	1021	1289
Coal-fired power plants	813	2080	3067
Hydroelectric power station	598	3492	8687
Nuclear plant	1807	4249	6215
Wind farms	1200	1911	2999
Solar power plants	937	1555	2563

Source: [319]

Also, different strategy options will differ in the levelized cost of electricity (LCOE), which is the average discounted cost of electricity produced by this type of power plant over its entire service life:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n ((C_t + OM_t + F_t + Cb_t + D_t) \cdot (1+r)^{-t})}{\sum_{t=0}^n MWh(1+r)^{-t}} \quad (3.15)$$

where  $C_t$  – investment costs in year  $t$ ;

$OM_t$  – operating and maintenance costs in year  $t$ ;

$F_t$  – fuel costs in year  $t$ ;

$Cb_t$  is the tax on CO<sub>2</sub> emissions;

$D_t$  is the cost of dismantling and disposal of waste in year  $t$ ;

$r$  is the discount rate.

Table 3.4 presents the global average LCOE calculated for different plant types using different discount rates.

Table 3.4 – Average world indicators of the levelized cost of electricity, USD/MWh

Power plant type	r, %	Minimum	Maximum
Gas power plant	3	60	135
Coal power plant		65	95
Nuclear plant		25	65
Gas power plant	7	65	138
Coal power plant		78	105
Nuclear plant		38	100
Gas power plant	10	70	142
Coal power plant		82	120
Nuclear plant		50	138

Source: [319]

In addition, it should be taken into account that, due to the long-term implementation of the strategy for the development of the national energy system, such a factor as scientific and technological progress has a significant impact on investment efficiency, due to which the return on investment curve shifts to the left (and the slope of the curve may also change) due to, from on the one hand, an increase in the energy efficiency of installations, and on the other hand, a reduction in the cost of installing 1 kW of power (Fig. 3.9).

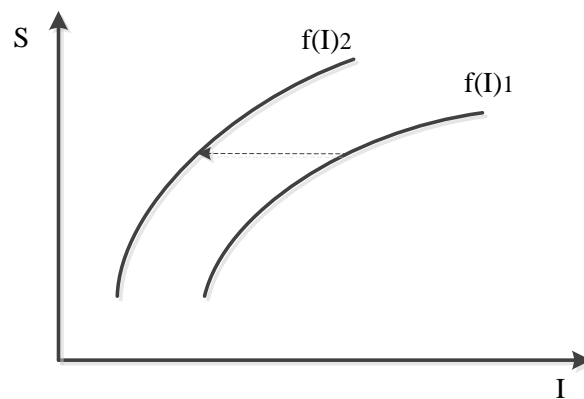


Figure 3.9 – A conditional example of shifting the curve of the functional dependence of the production potential of the energy system (S) on investments (I) to the left due to the development and implementation of new technologies

Source: compiled by the author

One of the advantages of the proposed method for analyzing the effectiveness and riskiness of energy system development options is to take into account the inertial properties of energy systems: the higher the inertial properties of the energy system development option, the more additional investments need to be made to increase the production potential of the system in response to an increase in energy demand. Investments in the development of the energy system may be reduced if, over time, it becomes clear that the economy is developing at a slower pace than predicted and requires less energy resources than planned. Then the less inertial the project, the less "excessive" investments will be made. Thus, less inertial options for

the development of energy systems will correspond to a lower value of the integral indicator  $I_{ad}$ .

The proposed method for assessing the riskiness and effectiveness of the energy system development option will help to identify such an option, which, on the one hand, is stable in its energy efficiency, on the other hand, can be easily adapted to the increased demand of the economy for energy resources, ensuring the long-term energy security of the country. The advantages of the developed method also lie in the fact that, while allowing to simultaneously evaluate such characteristics as riskiness and efficiency, it enables the expert, when analyzing alternative options for the development of the energy system, to take into account the socio-economic priorities of the state sectoral policy by changing the weights of the coefficients used to calculate the final integral indicator.

Approbation of the proposed method was carried out on the example of possible options for the development of the electric power industry. According to the Ministry of Energy, at the beginning of 2020, Russia has 246 GW of installed capacity of power plants of the interconnected energy systems with partial loading of generating capacities.

In the process of analysis, four options for the development of the electric power industry were considered, based on the following initial data: the load level remains at the current level; the expected annual increase in electricity demand is 1%; forecasting horizon – 10 years; the discount rate is taken equal to 7%. The data accepted for calculation on the available capacity of power plants and electricity generation are taken from the analytical reports of the Ministry of Energy of the Russian Federation, on the amount of specific investment per kW of installed capacity - from the analytical report of the International Energy Agency (Table 3.5).

The considered options differ in the structure of the introduced generating capacities:

Option 1 - the structure of commissioned generating capacities corresponds to the current structure of the installed capacity of power plants;



Option 2 - the growth of generating capacity, commissioned to cover the increased demand, is carried out mainly through the construction of thermal power plants on gas;

Option 3 - the growth of generating capacities, commissioned to cover the increased demand, is carried out mainly due to the construction of hydroelectric power plants and nuclear power plants;

Option 4 - the growth of generating capacity, introduced to cover the increased demand, is carried out mainly through the development of renewable energy sources.

Table 3.5 - Characteristics of the considered options for the development of the electric power industry

	Available power, GW	Generation, billion kWh	Investments, USD/kW	Structure of commissioned generating capacities, %			
				1	2	3	4
TPP	164,612	681,8	1 021	66,8	79,2	26,3	35
HPP	49,870	138,8	3 492	20,2	8	20	20
NPP	30,313	204,4	4 249	12,3	12	53	4
WES	0,184	0,22	1 911	0,1	0,1	0,1	20
SES	1,362	0,8	1 555	0,6	0,6	0,6	21

Source: compiled by the author

Since the options under consideration assume an expected annual increase in electricity demand equal to 1%, the most unfavorable situation that must be taken into account when assessing the risks of overinvestment is zero growth in electricity demand for the entire period under consideration (the probability of this scenario is assumed to be 0.2). Then all investments made under the options under consideration, which assume one percent growth, will be redundant. The maximum growth in electricity demand, for adaptation to which it will be necessary to make additional investments, is assumed to be 2% (the probability of this scenario is assumed to be 0.05).

When calculating the integral indicator  $I_{ad}$ , we transform the obtained values of  $I_e$  and  $I_r$  as follows: taking the smallest value of each of the indicators among all the analyzed options as a unit, we express through it the values of this indicator corresponding to other options. The results of the calculations are presented in table. 3.6.

Table 3.6 - Results of calculations of indicators  $I_e$ ,  $I_r$  and  $I_{ad}$ 

Variant	$l$	1	2	3	4
$I_e$	0,3	7,69	7,05	8,83	1,00
$I_r$	0,7	1,68	2,01	1,00	1,68
$I_{ad}$		3,49	3,52	3,35	1,48

Source: compiled by the authors

The analysis showed that the most preferred options for the development of the electric power industry are options 1 and 2, with option 2 being the most effective in terms of implementing a policy to reduce the risks of overinvestment. Option 3 is effective from the point of view of implementing adaptation investments to ensure the growth of demand for electricity, which is caused by low levelized costs for the production of electricity from hydroelectric power plants and nuclear power plants, however, it creates large economic risks of excess capital-intensive capacities in the event of an unfavorable option for socio-economic development. In the case of option 4, the opposite situation arises - relatively low economic risks are accompanied by high adaptation costs in the case of a favorable option for the development of the economy.

The calculations performed showed the possibility of using the developed method as an additional tool in the process of developing and substantiating the strategy for the development of energy systems.

### **3.3. The energy systems adaptability management in order to ensure the long-term energy security**

Due to the complexity of the organization of the national energy system and its extremely important role in the process of ensuring the efficient and uninterrupted functioning of the national economy, all countries, regardless of the level of liberalization of the national energy sector, control its development. The state uses certain instruments of direct or indirect influence to stimulate and determine the trajectory of the development of the national energy system. Goals, objectives and tools for conducting the state energy policy are determined by historical, economic and political conditions. However, in modern conditions, the world community is

faced with a number of fundamental long-term tasks, the solution of which is relevant for each country in the new paradigm of sustainable development: increasing the energy efficiency of the national energy system; the growth of its environmental friendliness; increasing the level of energy security of the national economy. The same macrotasks are facing the Russian society, and their solution is carried out within the framework of the development and implementation of the national energy policy, the main provisions of which are formulated in the "Energy Strategy of Russia for the period up to 2035" [6].

In modern conditions of growing geopolitical tension and the need for accelerated development of the economy, the most urgent task for Russia is to ensure national energy security. The problem of ensuring national energy security is exacerbated in conditions where, due to globalization and scientific and technological progress, production and energy systems are becoming more integrated and vertically specialized, as a result of which local disruptions in the supply of energy resources, spreading along the chains of industrial and economic relations, can cause significant economic losses.

The national energy system is a complex dynamic system, the development of which is determined both by internal processes occurring in the system itself and by exogenous factors of control by independent actors (companies, governments, international contractors). The development of internal trends in the energy system, due to the logic of the flow of technical and economic processes, can lead to an increase in its adaptive properties. Such a trend may be, for example, the emergence of new competing suppliers of energy resources in the context of the liberalization of the energy market, which, other things being equal, will increase the adaptability of the system as a whole. However, in order to ensure the stable growth of the adaptive properties of the national energy system by increasing its efficiency and the "correct" use of the results of scientific, technical and social development, a control effect on the system should be carried out through the development and implementation of a well-thought-out and scientifically based energy policy, directly aimed, among other

things, at ensuring energy security of the country by increasing the adaptive properties of the national energy system.

On an enlarged basis, two groups of methods for implementing the control action in order to increase the adaptive properties of the national energy system can be distinguished: methods of indirect influence; direct methods.

Indirect control methods are implemented as part of the energy and economic policy aimed at creating favorable conditions for the functioning of the national energy system that is, creating conditions in which energy companies, when developing and implementing adaptation measures, will not be burdened with excessive administrative and economic barriers. Direct control methods are implemented as part of the analysis of the functioning of the national energy system and the adoption of specific economic and organizational measures aimed at eliminating its “weaknesses” by increasing the reliability of the operation of certain elements of the system, creating new interconnections, etc.

Thus, a complex control action aimed at developing the adaptability of the national energy system implies, on the one hand, the creation of such rules and conditions for its functioning, in which, in the event of stressful events, the affected element of the system can carry out the adaptation process as soon as possible, including such stages, such as collecting information, attracting financial and material resources, as well as structural changes; on the other hand, the creation of such a number of elements and relationships between them that could most effectively participate in the redirection of energy resource flows in the event of a stressful event.

The question arises which methods (direct or indirect impact) should be given priority when developing a set of measures aimed at developing the national energy system and increasing its adaptability. The effectiveness and acceptability of the methods used depends on the current situation and the need for state intervention in the development of the national energy system [98]. Direct impact methods are certainly more expensive, since they are associated with direct financing of investment projects in the energy sector, provision of concessional loans to energy companies, etc., while indirect impact methods mainly bear costs in the field of

public administration. The use of direct impact methods is effective and necessary in the case of solving the problems of ensuring energy security in the medium term (that is, during the launch of new energy facilities), while indirect impact, creating favorable conditions for the development of energy companies and requiring much more time to manifest their positive results, should be aimed at creating long-term positive trends in increasing the adaptability of the national energy system. The main characteristics of different methods of control action on the energy system are shown in fig. 3.10.

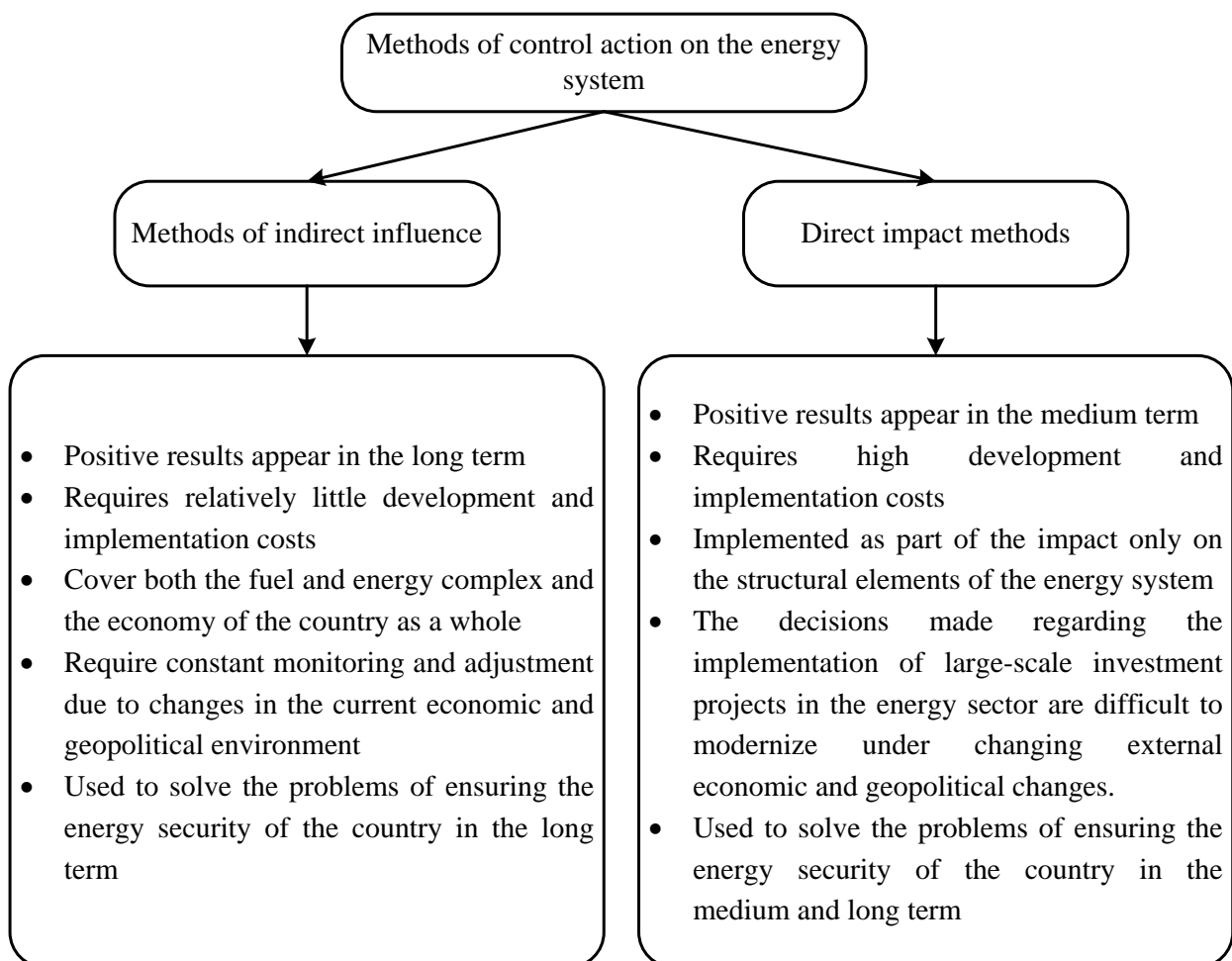


Figure 3.10 – Main characteristics of different methods of action control on the energy system

Source: compiled by the author

On fig. 3.10 shows that the indirect control impact on the national energy system affects not only the fuel and energy complex, but also the conditions for the

functioning of the country's economy as a whole, since the relationship between the economy and energy makes it necessary to increase the adaptability of the national energy system simultaneously with the development of the adaptive properties of the national economy.

The adaptability of the country's economy includes three elements (Fig. 3.11): the adaptability of the elements of the economic system at the micro level; adaptability of elements of the economic system at the mesolevel; adaptability of the economic system as a whole. Since the country's fuel and energy complex requires a large amount of financial and material resources, the stability of its functioning is ensured by the stability of the work of other sectoral systems of the national economy in the context of financial and economic crises, as well as in the context of the introduction of international sanctions. Thus, the control action aimed at increasing the adaptability of the national energy system should be focused both on the functioning of the system itself and on the general economic conditions for its functioning.

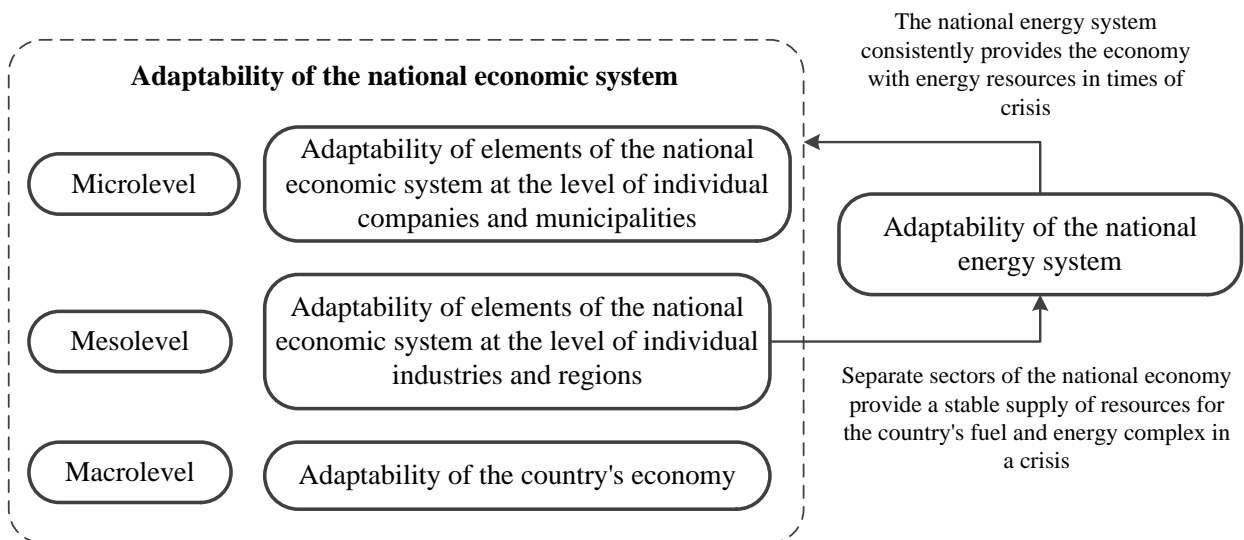


Figure 3.11 – The relationship between the adaptability of the national energy system and the adaptability of the country's economy

Source: compiled by the author

Activities aimed at increasing the level of adaptability of the national energy system can be grouped in accordance with the stages of the adaptation process, which

includes such phases as the occurrence of a stressful event, the reaction of the system to a stressful event, accompanied by a drop in the efficiency of its functioning (in relation to energy systems, expressed in the fall or complete cessation of the supply of energy resources), the development of adaptation measures and their implementation, the return of the system to efficient functioning. When developing a set of measures, it is necessary to take into account the features of each stage of the adaptation process and direct efforts to improve the overall efficiency of the adaptation process, which means, on the one hand, reducing the time required for the system to fully restore its efficiency after a stressful event, and on the other hand, reducing the required adaptation costs. Thus, measures aimed at increasing the adaptability of the national energy system can be combined into the following blocks:

1. Measures aimed at reducing the likelihood of stressful situations and the strength of their manifestation.
2. Measures aimed at reducing the negative consequences of the occurrence of a stressful event.
3. Measures aimed at reducing the time required for the system to fully restore its effectiveness.

It should be noted that the increase in the overall efficiency of the adaptation process is not linear (additive) in nature, when the overall efficiency is presented as the sum of the efficiencies of each stage of the adaptation process, but non-linear, since the effective implementation of measures within one stage of the adaptation process can greatly facilitate the development of measures and their successful implementation in another phase of the adaptation process. The relationship between different groups of activities carried out as part of the implementation of different stages of the adaptation process is shown in fig. 3.12.

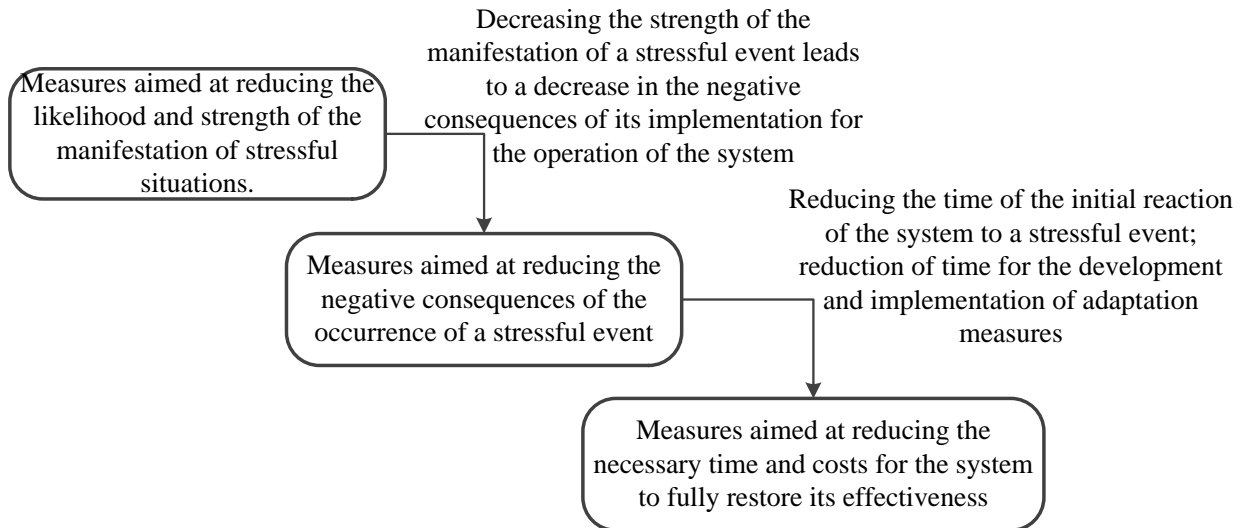


Figure 3.12 – The relationship of activities related to different stages of the adaptation process

Source: compiled by the author

A set of measures aimed at increasing the level of adaptability of the national energy system should combine not only all stages of the adaptation process, but also all the structural elements of the energy system related to different stages of the process of production, transportation and consumption of energy resources. In table 3.7, the value  $v_{ij}$  reflects the system of measures aimed at increasing the adaptability of energy subsystems, affecting the  $i$ -th stage of the adaptation process and the  $j$ -th stage of the energy production process.

Table 3.7 – Matrix of measures aimed at increasing the level of adaptability of the national energy system, combining the stages of the adaptation process and the process of production and consumption of energy

	Extraction of an energy resource	Energy resource processing and energy conversion	Transportation / Transmission and distribution of energy	Power consumption
Occurrence of a stressful event	$v_{11}$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{14}$
System response to a stressful event	$v_{21}$	$v_{22}$	$v_{23}$	$v_{24}$
Development of adaptation measures	$v_{31}$	$v_{23}$	$v_{33}$	$v_{34}$
Implementation of adaptation measures	$v_{41}$	$v_{24}$	$v_{43}$	$v_{44}$
System recovery (adaptation)	$v_{51}$	$v_{25}$	$v_{53}$	$v_{54}$

Source: compiled by the author



As noted above, ensuring the long-term energy security of Russia should not be based on increasing hydrocarbon production and ensuring the stability of their supplies, but on improving the quality and efficiency of energy supply. Accordingly, when developing measures aimed at increasing the level of adaptability of the national energy system, the main efforts should be focused on the stages of energy resource processing and energy conversion, energy transportation / transmission and distribution and energy consumption.

The development of modern energy systems is determined by the trend towards increasing their complexity. A complex system is a system in which a large number of independent elements and subsystems interact, which leads to the emergence of emergent properties. The complexity of the fuel and energy complex is formed not only by the number of elements in its structure, but also by their technological, organizational and economic diversity and a large number of diverse interconnections between them, which arise, among other things, due to the emergence and development of new digital technologies, the complication of interconnections between national energy systems, an increase in the number of actors in the energy market, the emergence of active consumers, etc.

The emergence of new elements of the national energy system can lead to maintaining a high level of adaptability. At the same time, the increase in the complexity of the system can lead to an increase in its vulnerability, since new elements and relationships can be exposed to stressors and disrupt the operation of other elements of the system (Fig. 3.14).

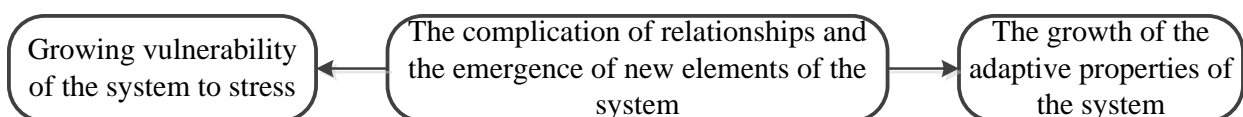


Figure 3.13 - Changes in the adaptive properties of the system as a result of its complication

Source: compiled by the author

In this regard, when developing an energy policy aimed at increasing the adaptability of the national energy system with an increase in its complexity in the context of digitalization and the emergence of new energy sources, the following principles for adding new elements and interconnections to the national energy system should be taken into account:

1. A new element of the system should introduce additional “redundancy” into the system in the form of an increase in reserve power, throughput capacity of intersystem communications, new reserves of primary energy resources, etc.

2. A new element as a technological, economic and self-governing unit must itself have adaptive properties that will allow it to function stably in stressful situations.

3. The emergence of new elements in the energy system must comply with the principle of the necessary diversity of U. R. Ashby. According to this principle, the stability of the system can be increased by increasing the manageable diversity of the structural elements of the system (that is, the elements and the links between them). Or, in other words, the more diverse actions available to the control system, the more disturbances it will be able to compensate for. With regard to energy systems, this principle is manifested in the fact that the emergence of new elements of the system should expand the management tools of energy companies and the state.

4. The new element should be aimed at reducing the inertia of the system. The fuel and energy complex is a highly inertial system, structural changes in which require a significant amount of time. The level of inertia of the national energy system has an inverse relationship with the level of its long-term adaptability. Thus, in order to increase the level of adaptability of the national energy system, a new element should be aimed at reducing its inertia by reducing the capital intensity of new power generation facilities, facilitating legal support for the implementation of investment projects in the energy sector, developing interconnections, developing small-scale distributed energy, the emergence and wide distribution of active consumers, etc. An active consumer of electricity is a consumer who, along with centralized power supply, uses his own power generation, which allows him, using

Smart grids technologies, to independently make decisions about his power consumption mode and sell excess electricity generated by him. Smart grids technologies make it possible to smooth out peak loads, reduce system reserves, optimize the operation of power plants and the power grid, and reduce costs and losses of electricity.

5. The new element should be aimed at increasing the diversification of consumed energy resources (in the direction of increasing the share of renewable energy sources), the structure of generating capacities by type of power plants and electricity suppliers. Diversification of these structural characteristics leads to an increase in the long-term adaptability of the national energy system by increasing its flexibility in terms of the possibility of implementing the most economically and technically efficient responses to stressful situations.

Considering the serious changes currently taking place in the global energy sector, the main driving force of which is technological innovations that contribute to the transition of energy systems to a fundamentally new stage of development, increasing the sustainability and adaptability of the national energy system will become possible if the new elements of the system correspond to the new development paradigm energy – sustainable energy.

In recent decades, significant transformations have taken place in the world economy, which have led to changes in the functioning of modern energy markets, and as a result, changes in the requirements for energy facilities and the infrastructure of electricity markets in general [8, 11, 27, 30, 80, 82, 131, 148]:

1. Growth in global demand for electricity and changes in its structure. The main factors in the growth of electricity consumption in the world are global population growth and an increase in the quality of life of the population. According to the International Energy Agency, by 2040 electricity production will increase from 25,500 TWh to 40,000 TWh. At the same time, as new technologies and the development of distributed generation make prosumers more and more effective participants in the energy market, the demarcation line between producers and consumers of electricity will blur, and the share of prosumers in the structure of

energy production and consumption will gradually increase. In addition, changes in the structure of electricity demand will be facilitated by changes in the industry due to the development of a technological base that is sensitive to the quality of electricity and the reliability of its supply.

2. Growth in demand for green energy. The production of electricity from fossil fuels is a significant source of pollutant and greenhouse gas emissions, which leads to environmental degradation, a decrease in the quality of life of the population and an increase in government spending on health and environmental protection. As a result, in order to improve the quality of life, many developed and developing countries are ready to use more expensive, but at the same time cleaner energy. The development and implementation of new energy technologies increases the sustainability of the national energy system by creating new complex adaptive structures.

3. Continued urbanization. High rates of growth in the number of new cities and the development of old ones lead to the need for the development of urban energy systems, which must be reliable in conditions of high spatial density of energy use. The main objectives of the development of urban energy systems are to reduce the cost of connecting to electricity networks, increase energy efficiency, reduce emissions of pollutants into the atmosphere, use new methods of locating energy facilities in conditions of high cost of urban land, etc.

4. Aging of large power plants. At present, the aging of large coal-fired power plants, hydroelectric power plants and nuclear power plants is observed all over the world. For example, according to the US Energy Information Administration (EIA), presented on the official website of the organization, the average age of commercial reactors in the US is about 37 years. About 74% of all coal-fired power plants in the US are over 30 years old. Analyzing the average age and technical service life of existing power plants in Europe, J. Farfan and C. Breuer conclude that by 2030, 48.6% of the capacity of gas-fired power plants, 78.3% of the capacity of oil power plants, 79.1% will be decommissioned capacity of coal-fired power plants and 81.7% of the capacity of nuclear power plants [238]. While the current situation is

facilitating a technological transition to sustainable energy, national energy systems require significant investment to modernize their elements.

Traditional energy systems developed with strong state support [192]. In the past few decades, developed country governments have reduced their intervention in the energy industry due to the liberalization of energy markets. At the same time, banks do not show interest in large energy projects due to the availability of more attractive investment projects. To solve the problem of maintaining, updating and modernizing national energy systems, it is necessary to make a transition to a new paradigm of the electric power industry, focused on investments in renewable energy sources, distributed generation and innovative technologies.

5. Digitization of energy. In recent years, national energy systems, along with other industries, have undergone significant changes. The introduction of new technologies in the energy sector has made it possible to increase the stability of national energy systems, increase the energy efficiency of the global economy, highlight prosumers as new participants in the energy market, etc.

The ongoing changes can radically change modern energy markets, and that is why it is very important to take them into account when developing measures aimed at increasing the adaptability of the national energy system. Realizing that the high adaptability of the national energy system cannot be ensured without complying with modern trends in the global economy and energy, in recent years the government has taken a course towards the modernization of the Russian electricity sector.

The process of digitalization of the energy sector, accompanied by the introduction of new technologies, changes in the information security standards of energy systems, the emergence of new participants in the electricity markets and changes in the requirements for facilities and infrastructure of the electricity markets, has led to the need to improve the relevant legislation. For example, in 2018, Federal Law No. 35-FZ of March 26, 2003 “On the Electric Power Industry” was amended to regulate relations in the wholesale and retail electricity markets, and unified requirements for smart devices and metering systems were introduced.

The changes introduced determine the maximum allowable volume of power supplies by generating facilities operating on the territory of the connected energy system, the terms for equipping the connected electric power system with the necessary measuring instruments, the features of technological connection to electric networks, and also enable electricity suppliers to deal with non-payments and theft of electric energy.

The introduction of smart devices and the creation of a unified electricity metering system will increase the adaptability of the Russian energy system by reducing the number of technological failures in the supply of electricity and reducing the time required to eliminate their consequences, control the quality of electricity consumed, and reduce electricity losses and operating costs [142, 272, 273].

As noted earlier, the increase in the complexity of the system as a result of the appearance of new elements and relationships in it can create additional risks and have negative consequences. In order to ensure the long-term stability and adaptability of the Russian energy system, it is necessary to establish by law the rules and mechanisms for interaction between the elements of the energy system and participants in the electricity markets. So, for example, it is necessary to define the rights and obligations of prosumers, clarify the rules for the operation of trading systems in distributed generation markets, taking into account the growing number of prosumers, and revise technical standards for energy facilities being put into operation.

In order to reliably and efficiently meet the needs of the domestic market for energy on the principles of energy saving and energy efficiency, as well as to transform the energy sector and other priority sectors of the economy through the introduction of digital technologies, appropriate changes were made to a number of state programs for the strategic development of Russia [4]. The change in strategic guidelines entailed the adjustment of the state program of the Russian Federation "Energy Efficiency and Energy Development" [2] and the approval of a new doctrine of the country's energy security [1]. To ensure the sustainable and efficient

functioning of the structural elements of the energy system related to different stages of the process of production, transportation and consumption of energy resources, directions for further work have been identified to improve the regulatory framework and reduce administrative and other barriers in order to attract investment in the energy sector; targets were set for investments in fixed capital in various sectors of the fuel and energy complex; it is planned to carry out a number of measures to ensure sustainable energy supply to consumers in certain territories of the Russian Federation, as well as to develop the main electrical network; measures are envisaged to stimulate the production of electricity based on the use of renewable sources. Supporting producers of clean energy and partially redistributing the tax burden of companies in the fuel and energy complex, the Ministry of Finance of the Russian Federation has proposed the introduction of an environmental tax, which should replace the existing payments for negative environmental impact. According to the proposal, flat tax rates would apply to air emissions, water discharges, and industrial waste disposal.

The energy policy aimed at ensuring the energy security of the country by increasing the adaptive properties of the national energy system should take into account the identified principles of structural changes in the country's fuel and energy complex. However, in a market economy, when most decisions regarding the implementation of certain energy projects are made at the level of energy companies, the development and implementation of a set of measures aimed at increasing the adaptability of the national energy system becomes a really difficult task, since it is necessary not only to solve technical and economic problems of functioning of the national energy system in the conditions of manifestation of stressful situations, but also to create a system of incentives to guide the management and owners of energy companies to include the criterion of adaptability of energy facilities (newly created or modernized) in the process of making managerial decisions.

The development of a methodology for substantiating a system of measures aimed at increasing the adaptability of the national energy system is a necessary part of developing an effective national energy policy in the new rapidly changing

conditions for the functioning of the fuel and energy complex, as well as taking into account shifts in the energy development paradigm, when energy security, environmental cleanliness and fuel supply reliability. Improving the validity of strategic decisions in the energy sector should be carried out by integrating new criteria for energy and economic efficiency, as well as new principles for the development of the national energy system in the decision-making process.

**Chapter conclusions.** Analysis of the scientific literature devoted to adaptability evaluation showed that methods are still developing. There are a number of factors that determine the dynamics of the evolution of assessment methods: the multidimensional nature of the concept of "adaptation"; uniqueness of real energy systems; dynamic and fundamental nature of the changes taking place in the global energy industry; complexity of quantitative assessment of adaptation processes.

It was shown that highlighting certain aspects of adaptability, the authors offer different indicators that can be used to assess its level. However, despite the rather large number of existing indicators, at present there are no methods for integrating the entire set of indicators to obtain a comprehensive quantitative assessment of the level of energy systems adaptability. In order to create an algorithm for a comprehensive assessment of the energy systems adaptability, the existing adaptability indicators were systematized in accordance with the stages of the adaptation process.

An analysis of the factors that form the adaptive properties of energy systems and the indicators used to assess adaptability made it possible to identify methodological principles for the energy systems adaptability evaluation. The principles were used to develop an algorithm for the energy systems adaptability evaluation. Since there is no single set of indicators that would meet all requirements for the energy systems adaptability evaluation, the developed algorithm is a methodological basis for choosing a system of indicators for each specific case, which differs in the size of the energy system under consideration, forecast horizon, technical and economic features.



The features of the developed approach are the following: it covers all stages of the adaptation process; it is based on the identified principles for the energy systems adaptability evaluation; it takes into account not only market and production environmental changes, but also financial, economic and socio-political ones.

The necessity of using the criterion of adaptability in the analysis of strategies for the national energy system development is demonstrated. In order to increase the validity of the energy development strategies, a method for assessing the level of adaptability of alternative strategies was proposed. The method makes it possible to find a balance between riskiness of the given strategy and its efficiency. Riskiness of a strategy means the likelihood that, due to the outstripping development of the economy compared to the energy industry, the national energy system will be unable to fully satisfy the demand for energy resources. Efficiency of a strategy means the absence of excessive investments in the energy sector.

Since the national energy system is a complex dynamic system, the development of which is conditioned both by internal and exogenous factors, the emergence of new elements can lead both to an increase in the vulnerability of the system, and to an increase in its adaptive properties. During the research the key principles for adding new elements and interconnections to the national energy system with the aim to increase its adaptability were developed.

## **CHAPTER 4. ENERGY SYSTEMS ADAPTABILITY IMPROVEMENT: THE ROLE OF INVESTMENTS**

### **4.1. Investments as a tool to improve the energy systems adaptability**

Investments are a necessary resource that ensures the progressive development and transformation of the national energy system, which leads to an increase in its adaptive properties [21, 47, 58, 59, 88, 197]. It is thanks to investments that the modernization and restructuring of energy systems takes place, which contributes to their “adjustment” to the new operating conditions and the creation of financial and technical reserves. Based on the study of the identified factors that ensure the adaptive properties of energy systems, as well as the formulated principles for adding new elements and relationships to the national energy system, the following main directions of the positive impact of investments on the adaptive properties of energy systems were identified [95]:

1. Increasing the production capacity of the energy system as a whole. The creation of new production elements of the system, other things being equal, increases the production potential of the system as a whole and makes it possible to cover a greater demand for energy. For example, in power systems, each new investment project that creates new generating capacities increases the total capacity of the power generation system and makes it possible to redistribute the power supplied to consumers by power plants within the power grid.

The growth of production capacities determines the growth of the market supply of energy resources, which in the long term is a necessary condition for the implementation of economic growth, leading to an increase in demand for energy resources.

2. Increasing the power reserve. A capital investment project for the construction of new production facilities may involve the creation of a reserve of capacity to cover an abrupt increase in energy demand. In this case, the total reserve capacity of the entire energy system, which includes a new industrial facility, will grow, increasing, in turn, the adaptability of this system. The total reserve capacity of

the system is an important factor in ensuring the adaptability of the system to changing conditions, since it is the reserve capacity that can be used in critical situations:

- in the event of an accident of one of the production elements of the system;
- when entering new markets;
- while meeting the needs of a rapidly growing economy in energy resources.

3. Renovation of fixed assets of the energy system. The construction of new production facilities updates the fleet of equipment used in the energy system as a whole. Because new equipment tends to be more efficient (less cost per unit, more environmentally friendly, supports more operating modes, starts up faster, lasts longer, etc.) and more adaptable to changing conditions (due to faster startup, more compact size, greater safety and reliability in operation), then the renewal of the fixed assets of the energy system increases its adaptability. This circumstance is especially relevant for Russia due to the strong obsolescence of fixed assets of energy facilities.

4. Increasing the economic efficiency of the functioning of the energy system. The more efficient the energy system, the more adaptive it is to changing external conditions, since, firstly, the income from the operation of the energy system can be a reserve used for adaptive measures, and secondly, high economic efficiency attracts new investments, which in turn queue will help increase its adaptability.

5. Expansion of sales markets. In some cases, large-scale investment projects may be associated with the entry of energy companies into new energy markets. In this case, the uncertainty of the functioning of the energy system associated with the volatility of energy markets will decrease due to the diversification of sales markets, and the adaptability of the energy system as a whole will increase due to its possible reorientation with certain changes from one sales market to another.

6. Development of infrastructure. The construction of new industrial facilities is accompanied by the development of industrial infrastructure, which increases the adaptability of the energy system. This circumstance is especially relevant for the electric power industry, where the construction of a new power plant is accompanied by the development of electric networks, which increase the adaptability of the

electric power system as a whole due, on the one hand, to an increase in the transmission capacity of the networks, and on the other hand, to expand the possibilities of connecting new electricity consumers to the networks.

7. Change in the share of inertial elements in the energy system. Large-scale investment projects can change the level of adaptability of the energy system by changing the share of inertial, non-mobile elements in the structure of assets. An example of inertial elements can be expensive gas pipelines that require large fixed costs, but at the same time limit sales markets. A decrease in the share of inertial elements in the structure of assets leads to an increase in the level of adaptability of the energy system by reducing the time required to adjust the system to new conditions.

On fig. 4.1 systematized system-wide effects from the implementation of real investments.

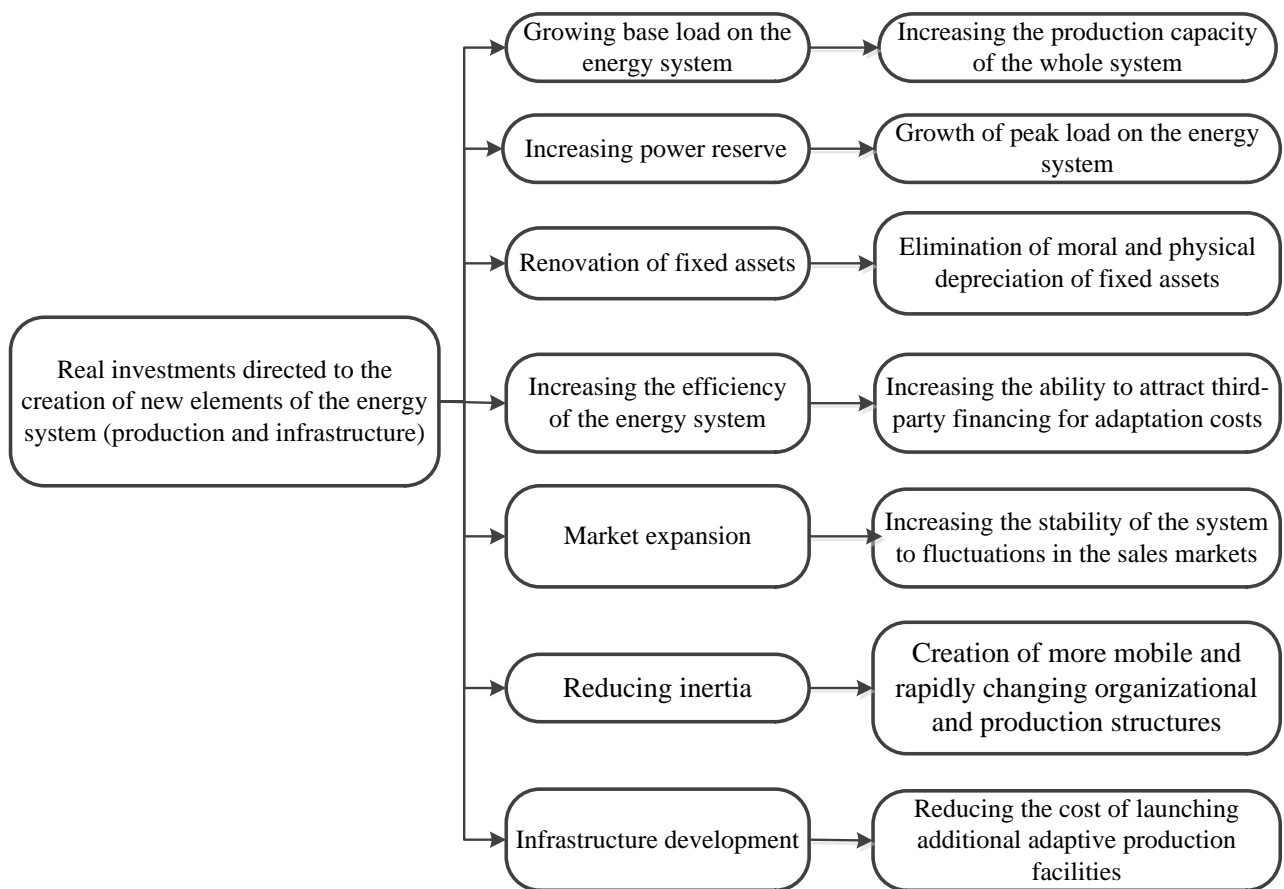


Figure 4.1 – System-wide effects from the implementation of real investments

Source: compiled by the author

The indicated directions of the positive impact of investments on the adaptive properties of energy systems were identified on the basis of an analysis of the principles of adding new elements and relationships to the national energy system in order to increase its adaptive properties. Based on the identified areas, it is possible to propose criteria for evaluating investment projects in terms of the effectiveness of their impact on the adaptive properties of the energy system (Table 4.1).

Table 4.1 – Criteria for evaluating investments, systematized in terms of their compliance with the principles of adding new elements to the system in order to increase its adaptive properties

Directions of influence of the investment project on the adaptive properties of the system	Investment evaluation criteria
The emergence of a new "redundancy" in the system	
Increase in power reserves; increasing the production capacity of the system	The size of the increase in the production capacity of the system; changes in reserves
Adaptability of a new element of the system	
Adaptability of investment projects; increasing the economic efficiency of the system; renewal of the system's fixed assets	The degree of depreciation of the BPF of the energy system; changes in the capitalization of the company; adaptability of individual investment projects
Ashby's principle of necessary variety	
Infrastructure development; expansion of sales markets	The ratio of the sum of the available capacity of power plants and the capacity of interconnections; capacity of gas and oil pipelines; capacity of gas liquefaction plants; capacity of markets for energy resources
Decreased system inertia	
Reducing the share of system inertia	Capital costs per unit of installed capacity; share of small distributed energy
Increasing diversification	
Diversification of the energy balance; diversification of energy resource suppliers	The Herfindahl-Hirschman index for energy resource suppliers; PDFT (Probability of different fuel type) indicator to assess the diversification of the energy balance

Source: compiled by the author

To analyze the emergence of a new "redundancy" in the system as a result of the project, you can use indicators such as the increase in the production capacity of the system ( $\Delta PC$ ) and the increase in reserve capacity ( $\Delta RP$ ):

$$\Delta PC = \frac{(PC_1 - PC_0)}{PC_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\Delta RP = \frac{(RP_1 - RP_0)}{RP_0} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Where  $\Delta PC$  – increase in production capacity, %;

$PC_0$  и  $PC_1$  – production capacity of the system before and after the implementation of the project under consideration;

$\Delta RP$  – standby power increase, %;

$RP_0$  и  $RP_1$  (*reserve power*) – reserve capacity of the system before and after the implementation of the project under consideration.

To analyze the adaptability of a new element of the system introduced into the system through the implementation of an investment project, one can use indicators such as the AE (*Adaptation-Efficiency*) coefficient, the change in the degree of depreciation of the fixed production assets (*OPF*) of the energy system, and the change in the capitalization of the company.

The lower the degree of depreciation of the BPF is assumed by the considered investment project, the more attractive it is from the point of view of increasing the adaptability of the energy system by reducing the accident rate of production, improving technological and technical and economic indicators.

The stronger the capitalization of an energy company rises, the more opportunities it has to attract resources for adaptation measures. To determine the impact of the implementation of a large-scale investment project on the company's market capitalization, it is proposed to use the basic method of fundamental analysis, namely the method of discounting future cash flows. The capitalization of the company is determined by the formula:

$$C = A + \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{(1+r)^i} \quad (4.3)$$

where  $C$  is the capitalization of the company;

$A$  is the market value of the company's total assets;

$P_i$  is the company's net profit in the  $i$ -th period;

$r$  is the discount rate.

The increase in the capitalization of the company in the case of the implementation of the project should occur by the amount of change in the second term of the above equation. Thus:

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{(1+r)^i} \quad (4.4)$$

where  $\Delta C$  – expected change in capitalization in case of project implementation;  
 $\Delta P_i$  – change in the company's net profit in the  $i$ -th period, caused by the implementation of the project.

In real conditions, different investors will have different ideas about future changes [29, 90]. The range of ideas about future changes will be the narrower, the more information about the project will be available to stock market participants. The degree of change in the company's market capitalization as a result of a negative or positive attitude of stock market participants to the implementation of a large-scale project can be assessed by an expert method. Several experts not involved in the development of project materials must independently provide forecasts of changes in net income from period to period as a result of the project. Substituting the obtained data into the formula, we obtain several values of the expected changes in capitalization, from which the expected change in the company's capitalization can be calculated using the average calculation method.

The degree of influence of each specific investment project on the level of adaptability of the energy system depends on the integration of the new facility into the national energy system, the number of stages of energy conversion affected, the level of use of new energy-efficient technologies, the scale of investments made, etc.

Ashby's principle of the necessary diversity when adding new elements to the system is implemented as part of the expansion of sales markets and infrastructure development, which leads to the implementation of investment projects, since in this case there are more diverse actions available for the management system, and the management tools of energy companies and the state are expanding. It is possible to assess how the project under consideration complies with this principle using such indicators as the change in the ratio of the sum of the available capacity of power plants to the capacity of interconnections ( $\Delta CTC$ ); capacity of gas and oil pipelines; capacity of gas liquefaction plants; capacity of markets for energy resources:

$$\Delta CTC = KTC_1 - KTC_2 = \frac{TC_1}{PC_1} \cdot 100 - \frac{TC_0}{PC_0} \cdot 100 \quad (4.5)$$

where  $\Delta CTC$  – coefficient of throughput capacity;

$PC_0$  and  $PC_1$  – production capacity of the system before and after the implementation of the project under consideration;

$TC_0$  and  $TC_1$  – bandwidth of interconnections before and after the implementation of the project under consideration.

The inertia of the energy system, among other things, is determined by the level of costs for the increment of additional production capacities ( $MI$ ) and the share of small distributed generation in the structure of generating capacities ( $DG$ ).

The increase in the level of diversification of the energy system as a result of the implementation of investments can be assessed using indicators such as the Herfindahl-Hirschman Index ( $HHI$ ) (for energy resource suppliers);  $PDFT$  is indicator to assess the diversification of the energy balance:

$$HHI = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (4.6)$$

where  $p_i$  – share of energy resource supplies by the  $i$ -th supplier, in fractions of a unit.

$$PDFT = 1 - \sum_{i=1}^N S_i^2 \quad (4.7)$$

where  $N$  is the number of types of energy resources used in the economy to generate electricity;

$S$  is the share of the total power of power plants using the  $i$ -th type of energy resource in the total power of power plants used in the economy.

To analyze the mechanism of the impact of investments on the level of adaptability of energy systems, it is necessary to distinguish between the total flow of aggregate investments in the fuel and energy complex and individual large-scale investment projects.

Large-scale projects include investment projects with the following characteristic features: the significance of investment volumes and the duration of the implementation period; significant impact on the financial and economic condition of



the selling company and on its market capitalization; high social, political and economic significance for the industry, region and country as a whole; the presence of a feedback effect. In relation to the fuel and energy complex, these features are added: a significant impact on the environment and high uncertainty in energy prices due to market liberalization and strengthening of foreign economic relations.

On fig. 4.2 presents the distinctive features of large-scale investment projects in the fuel and energy complex.

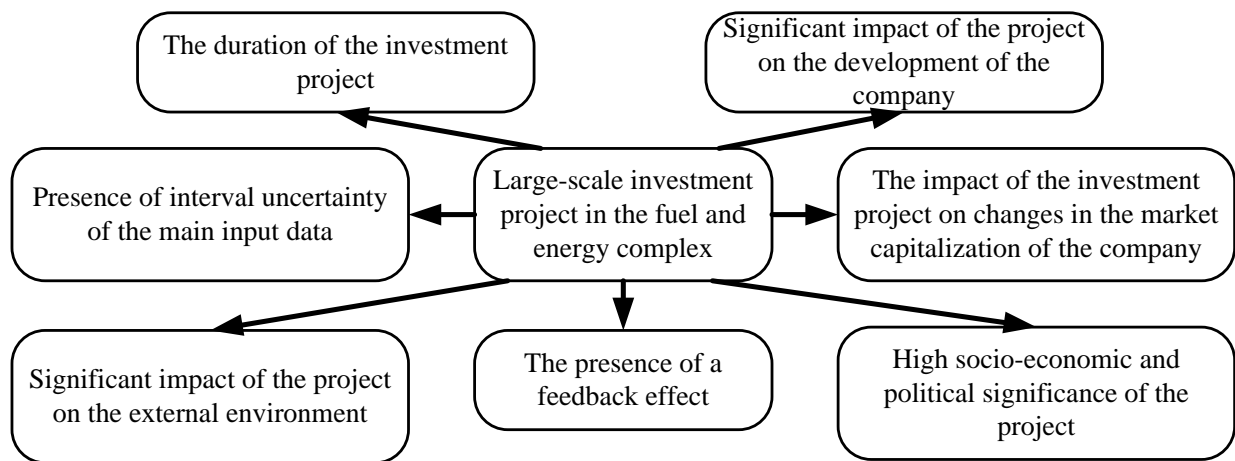


Figure 4.2 – Distinctive features of large-scale investment projects in the fuel and energy complex

Source: [101]

The duration of the investment project. Investing in the fuel and energy complex is a strategic, long-term investment, in which the time interval separating the start of the project from the start of the main production is significant. This imposes certain difficulties on the process of forecasting future macroeconomic and technical and economic indicators. There is a problem of choosing the optimal time to start the project.

The length of the project implementation period creates great difficulties in forecasting future key technical and economic indicators, such as demand and price for energy carriers, which is explained by the complexity of the forecasting procedure itself.

Significant impact of the project on the development of energy companies. Investment activity, being a means to achieve the goals of the organization, should be considered in the context of the development of the company. An investment project, as well as the financial and economic position of any company, can be assessed from the standpoint of the ratio of risk and income. The implementation of investments with their inherent level of risk and return has a direct impact on the level of risk and return of the company's activities as a whole. The mechanism of influence of the investment project on the financial and economic condition of the company is as follows. The investing company assumes the level of risk inherent in the project and also receives an additional return on investment. If the total risk of the enterprise and its total return before the implementation of the project are different from the level of risk and return of investments, then after the implementation of such investments, the total level of risk and return of the company should change.

The impact of the investment project on the change in the market capitalization of the company. As a consequence of the impact of the investment project on the financial and economic position of the company, changes in its market capitalization can be observed.

The financial market is sensitive to information relating to issuers, in particular to information that a company whose shares are traded on the stock market has decided to implement a large-scale project. Ultimately, the activities of companies are aimed at increasing the wealth of shareholders, which is formed from two sources: an increase in the value of shares and profits. Thus, in the case of assessing the riskiness of large-scale projects, it is necessary to analyze how the decision to implement a large-scale project will affect the company's capitalization. This task is complicated by the fact that the impact of the project on the capitalization of the company is not instantaneous. So the initial reaction of the market to the news about the acceptance of a project for implementation is fast. However, during the actual implementation of the project, stock market participants will overestimate the value of the project. Thus, there is a multiplication of risks: if the project brings less profit than expected, then the investor will lose not only from a decrease in income generated by the project, but

also from a decrease in capitalization; if the project proves to be more efficient, the market will respond with an even greater increase in demand, and hence the share price.

High social, economic and political significance of the project. The high importance of large-scale projects leads to the fact that in the process of determining the effectiveness of investments, the role of methods for assessing political, social and economic risks increases. So the co-orientation of the project to the emerging and real economic, political and social trends can enhance the positive effect of its implementation. The implementation of an investment project that is not consistent with current and future trends will lead to a worsening of the company's position rather than to obtaining additional benefits. As an example, we can cite the situation with the oil pipeline "Eastern Siberia - the Pacific Ocean" of NK "Transneft". The original version provided for the laying of an oil pipeline 800 meters from Lake Baikal, which threatened its environmental safety. However, the resistance of the public and environmentalists led to the removal of the oil pipeline by 350-400 km from the largest freshwater lake on the planet. In this situation, the environmental risk was realized in the need to increase the length of the pipeline by 1920 km, which, of course, is associated with additional costs that could be taken into account by paying due attention to the assessment of the environmental and socio-economic significance of this project.

Thus, when evaluating the risks of capital investments, it seems unacceptable to neglect the fundamental property of large-scale projects to increase tensions in the economic and social environment. Therefore, in the system of general analysis of the effectiveness of the project, it is necessary to include an assessment of its compliance with the general economic and social trends of the country's development.

The presence of a feedback effect. When deciding to finance a project, an investor primarily focuses on the cash flow potentially generated by the project. The intensity of this flow will depend on the prices of products (goods, services) obtained as a result of the functioning of the investment object. Accordingly, the investor or the decision maker analyzes the situation in the market of interest, assesses the

prospects for changes in prices for both raw materials and final products, and makes a decision on investment. However, the implementation of a large-scale project can significantly affect the balance of supply and demand in the market, which will ultimately lead to price changes. Thus, the principle of the classical economic school does not apply here, which consists in the fact that one producer does not affect the equilibrium price, since a significant amount of production is thrown onto the market by one participant. The presence of the feedback property leads to a decrease in price stability, for example, with an increase in output. An illustrative example is the implementation of one of the options for using the Kovykta gas condensate field located in the north of the Irkutsk region. The natural gas of this field contains a relatively large proportion of helium (about 0.25%). One of the options for using this field is the separation of helium from natural gas and its sale on the world market. However, the volumes of helium produced will be so significant (40% of world consumption) that this will inevitably affect its price level. Large-scale projects in the fuel and energy complex have an impact on energy markets, as well as through a feedback system on the economy as a whole.

Presence of interval uncertainty of the main initial data. Large-scale investment projects in the fuel and energy complex are characterized by high uncertainty in the initial data. This circumstance is due to the following reasons:

- large-scale projects in the fuel and energy complex are long-term, which leads to the need to predict changes in socio-economic indicators for the distant future;
- when assessing the consequences of implementing large-scale projects, it is difficult to predict the reaction of the external environment (feedback effect). The implementation of a large-scale project leads to a change in market conditions, which means it can lead to a change in the main economic indicators;
- the complexity of using the statistical method to obtain the probability distributions of variables, due to the uniqueness that each large-scale project in the fuel and energy complex has;

– world energy markets are characterized by high volatility, which has a strong impact on prices in the Russian fuel and energy complex, a significant part of whose products are exported.

As a result of the high uncertainty for a number of factors (eg energy prices, volume of demand, etc.) it is very difficult to obtain reliable probability distributions. At the same time, it is possible to forecast intervals of future values of a particular variable, the probability of falling into which tends to unity. This type of uncertainty is called “interval uncertainty”. “In the general case, we are talking about interval uncertainty if only some (discrete, formed by one or several intervals, or some other) set of its possible values is known about the project effect, but not the probability distribution on this set” [29, p. 471].

Interval uncertainty creates difficulties in using traditional methods of risk assessment and accounting when analyzing the effectiveness of investments using given probability distributions. It seems inappropriate to set probability distributions under conditions of extreme uncertainty of the initial data, since any assumptions about the nature of the probability distribution under such conditions are unreasonable, which means that riskiness analysis based on an assessment of such a distribution will be unreasonable.

An analysis of the features of large-scale investment projects in the energy sector allows us to talk about their significant impact on the long-term adaptability of the national energy system. On the one hand, a large-scale investment project affects the level of adaptability of the national system as its integral element, which, in the event of some changes in socio-economic factors, can act as a stabilizing element by increasing the supply of energy resources, redirecting fuel supplies, etc. On the other hand, the level of adaptability of the largest project increases the level of adaptability of the entire national energy system.

Significant technical and economic parameters of the influence of the general flow of investments and large-scale investment projects on the adaptive properties of the energy system are different. For the general flow of investments, the following

parameters can be distinguished, which must be considered when analyzing the state of affairs in the fuel and energy complex:

1. Investment volume. The total investment required to maintain the current level of adaptive properties of the energy system should be sufficient to replace obsolete and obsolete equipment. This parameter depends on many indicators (the rate of return in the economy as a whole and in the fuel and energy complex in particular; the level of business risks; volatility in financial markets; the stability of the political system, etc.), which together characterize the investment attractiveness of the country's fuel and energy complex.

2. Main directions of investment. It is not individual investment projects that are of central importance, but the general trends in the investment policy of investors in the fuel and energy complex (the share of inertial objects is increasing or decreasing; whether funds are invested in the development of new fields; whether the infrastructure of the fuel and energy complex is developing at a faster pace, etc.).

3. The level of investor diversification. If the sources of financing investment projects are sufficiently diversified, that is, small investors, foreign investors, the government of the country, large domestic investors (including institutional investors), as well as the energy companies themselves, can and wish to invest through the financial market institution, a situation is created when the investment flow becomes sufficiently resistant to stressful events. When the main source of financing is the state or a few large corporations, the investment flow becomes sensitive to risks of a different nature.

4. Dynamics of development of related fuel and energy industries. For the dynamic development of energy systems, the creation of flexible and adaptive management structures, it is necessary that, within the framework of the national economy, industries associated with the fuel and energy complex develop, that is, those industries that are a source of labor and material resources for companies in the energy sector. In the context of globalization and integration of national companies with foreign contractors, the significance of this parameter is decreasing. However, in the context of growing geopolitical tensions and the introduction of international

sanctions, when domestic energy companies are denied access to technological developments and international economic cooperation, this factor again becomes relevant.

Based on the characteristics of large-scale investment projects, the following parameters can be distinguished that must be considered when analyzing their impact on the adaptive properties of the energy system.

1. Project efficiency level. Effective large-scale projects create conditions and a technological springboard for the implementation of other investment projects. That is, the implementation of a technologically and economically efficient project increases the investment attractiveness of the fuel and energy complex as a whole, thereby having a positive impact on the adaptive properties of the energy system.

2. Adaptability of the investment project. The adaptability level of a large-scale fuel and energy investment project is its ability to remain cost-effective and perform its functions of supplying energy resources to consumers in the face of adverse changes. If the project is adaptive, the risks of suspending the project in case of deterioration in external conditions are reduced, the likelihood of attracting additional financial resources, if necessary, etc. is increased.

3. Change in the production and transport potential of the system within which a large-scale investment project is being implemented.

4. Geopolitical and social significance of the project. Geopolitically and socially significant projects increase the adaptability of the system by expanding interaction networks as a result of establishing new external and internal links between energy companies involved in project implementation, with international contractors, companies from related fuel and energy industries, new highly qualified employees, etc.

#### **4.2. Adaptability of investment projects in energy industry**

The study of the adaptability property of complex dynamic systems using marginal analysis tools used in making managerial decisions made it possible to identify and describe the adaptability property of investment projects in the fuel and

energy complex in the context of the impact of the implementation of individual large-scale investment projects on the adaptive properties of energy systems [105].

The level of adaptability of an investment project in the fuel and energy complex is determined by its ability to maintain its economic efficiency by attracting additional costs in the event of a stressful event in the form of an unfavorable change in some factor  $x$ . At the same time, the following functional dependence can be distinguished, reflecting the relationship between net present value (NPV), changes in some factor ( $\Delta x$ ), leading to a decrease in NPV, and additional costs for adaptation ( $C$ ):

$$\Delta NPV = f(\Delta x, C) \quad (4.8)$$

$$\Delta x \rightarrow \max$$

$$C \rightarrow \max$$

$$\Delta NPV \rightarrow 0$$

With the growth of an unfavorable change in the factor  $x$  to maintain the planned level of NPV, the costs of adaptation will also grow. However, it should be noted that investment projects have adaptation limits when a further change in the  $x$  factor, leading to a decrease in NPV, cannot be compensated by additional costs. This circumstance is explained by the nature of the dependence of NPV on the change in the factor  $x$  and on the growth of additional costs (Fig. 4.3 and Fig. 4.4).

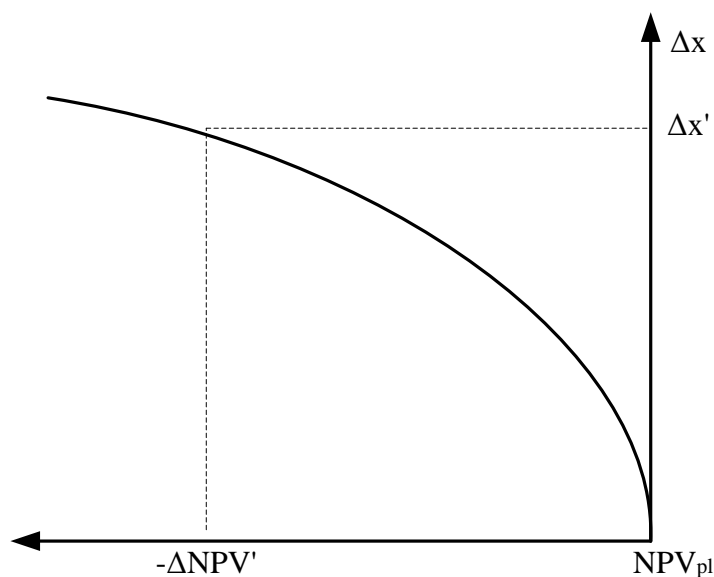


Figure 4.3 – Dependence of the NPV value of the project on the change in factor  $x$

Source: compiled by the author



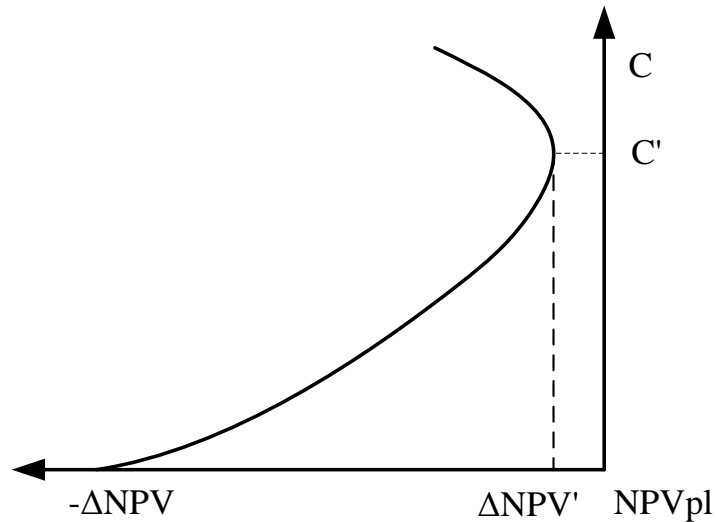


Figure 4.4 – Dependence of the NPV value of the project on the additional costs of adaptation

Source: compiled by the author

An increase in additional costs for adaptation to a change in the factor  $x$  can reach the level  $C'$ , when the increase in additional costs will be accompanied by a decrease in the increase in NPV:

$$\frac{C}{\Delta NPV} = \begin{cases} > 1, & C > C' \\ \leq 1, & C \leq C' \end{cases} \quad (4.9)$$

The efficiency of adaptation costs for a given change in factor  $x$  is:

$$EAC = \frac{C}{\Delta NPV_x} \quad (4.10)$$

where  $\Delta NPV_x$  – increase in net present value due to adjustment costs incurred.

The lower the *EAC* (*Efficiency-of-Adaptation-Costs*) score, the more efficient the adaptation costs. Moreover, the costs of adapting the investment project will be effective if the inequality:

$$0 \leq \frac{C}{\Delta NPV_x} \leq 1 \quad (4.11)$$

At the same time, the amount of adaptation costs  $C$  depends not only on the degree of unfavorable change in factor  $x$ , but also on the time of this change. The later an adverse event occurs, the more difficult it is to reach the level of project efficiency due to adaptation costs.

The degree of adaptability of an investment project can be characterized by the *AE* (*Adaptation-Efficiency*) coefficient, calculated using the *VaR* (*Value-at-Risk*) indicator:

$$AE = \frac{C}{VaR} \quad (4.12)$$

The AE ratio reflects the level of additional costs in relation to the indicator of maximum VaR losses, which will be effective in terms of restoring the planned NPV level. The higher the AE index, the higher the adaptability of the project, since the greater the potential for the project to “adjust” to changing external conditions. The AE coefficient gives a conceptual idea of the adaptive properties of investment projects and helps to form a strategy for making managerial decisions aimed at reducing the risks of capital investments.

The maximum loss VaR characterizes the maximum expected loss during a given period of time with a given probability level, usually taken as 0.95 or 0.98. In conditions of high uncertainty of the initial data and the multifactorial nature of investment projects in the fuel and energy complex, the following method, consisting of three stages, can be used to find the value of VaR.

At the first stage, the Monte Carlo method simulates the deviations of the values of the main technical and economic factors from the planned levels and determines the deviation of the value of the resulting investment indicator NPV (Fig. 4.5). In this way, a cycle of repetitions is carried out [271].

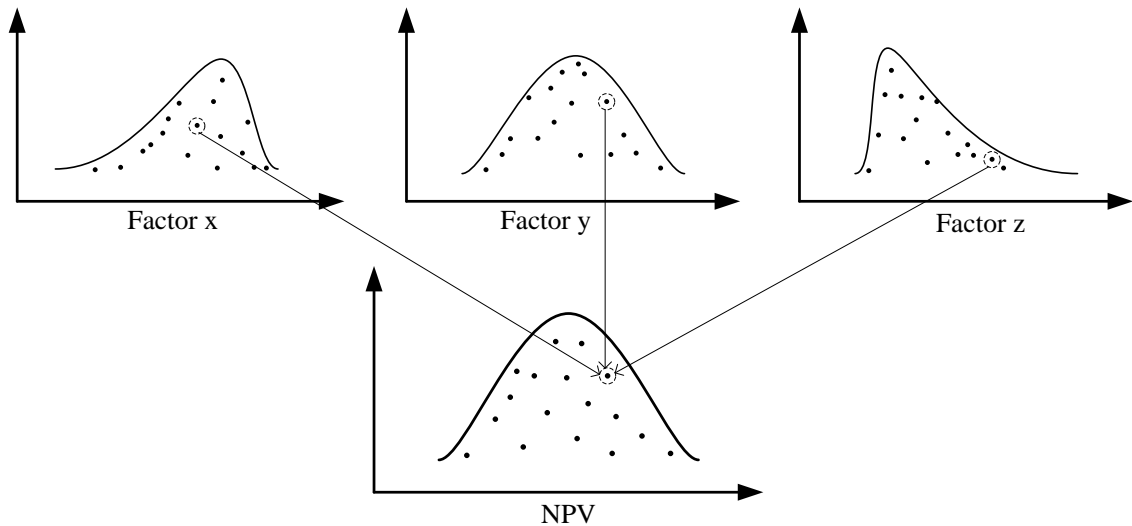


Figure 4.5 – Scheme of using the Monte Carlo method to find the deviation of the value of the resulting investment indicator NPV

Source: compiled by the author

At the second stage, based on the analysis of the obtained set of values, the probability distribution of possible NPV values is constructed (Fig. 4.6).

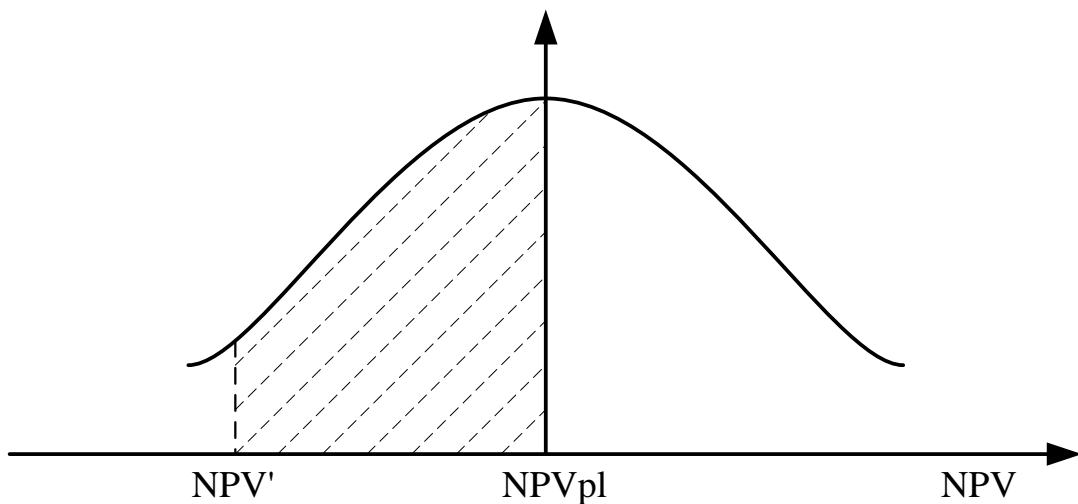


Figure 4.6 – Probability distribution of possible NPV values

Source: compiled by the author

On fig. 4.6 all possible losses are reflected to the left of the y-axis and are taken as 100%. The  $NPV'$  – value corresponds to the maximum reduction in the net present value of the investment project with a 95% confidence level.

At the third stage, based on the obtained distribution of NPV values, the value of the VaR indicator is found. For investment projects in the energy sector related to the extraction, processing and transport of energy resources, one of the key parameters that determine economic efficiency ( $NPV_{pl}$ ) is the value of the price of an energy resource. Since the investment horizon for projects in the energy sector is, as a rule, 20-25 years, and even longer for construction options for hydroelectric power plants and nuclear power plants, prices are set by a time-varying interval of expected values, which is used in assessing the economic efficiency of capital investments.

In the context of growing uncertainty and volatility of energy markets, the complication of socio-political and economic relations between countries, the acceleration of the pace of scientific and technological progress, which directly affects the development of the energy sector, in order to increase the validity of investment decisions in the energy sector, it becomes expedient when calculating the economic efficiency of capital investments not to take into account only the expected minimum and maximum prices for energy carriers, but also their maximum possible values.

Forecast of the corridor of expected prices for energy resources, carried out by such organizations, companies and institutions as the International Energy Agency, BP, the Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, is based on the forecast of the development of the world economy with reference to the supply and demand for energy resources (the stages of the forecasting process are shown in Fig. 4.7). Limit prices, unlike expected prices, are determined not on the basis of supply and demand, but on the basis of the economic capabilities of energy producers and consumers to make transactions for the purchase and sale of energy resources.

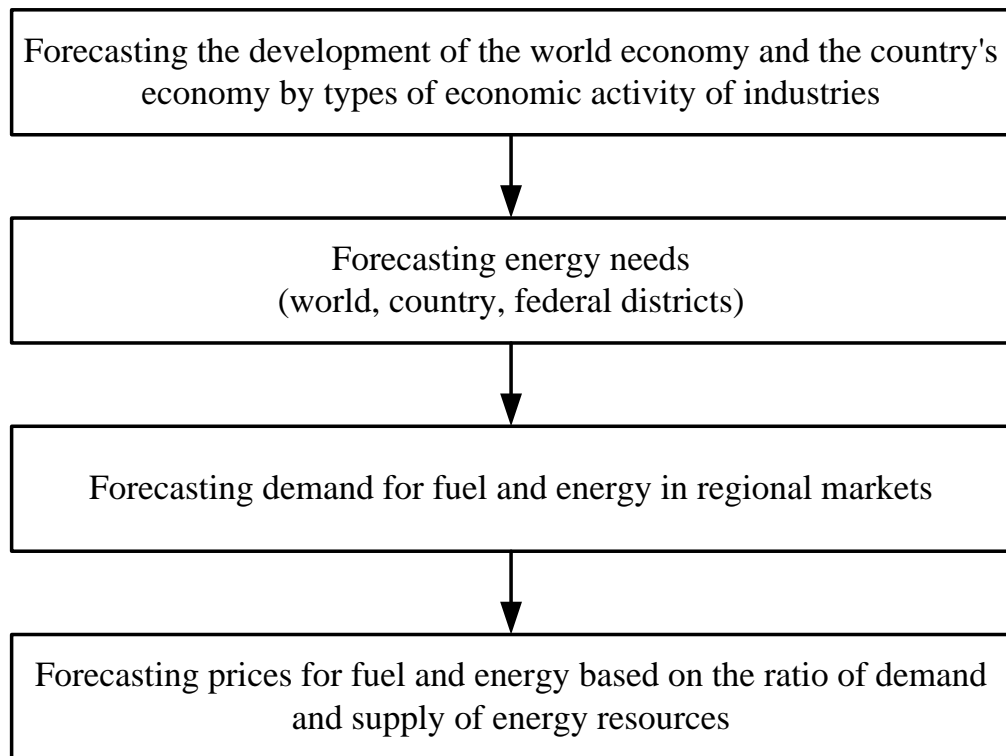


Figure 4.7 – Stages of the process of forecasting energy prices

Source: compiled by the author

The maximum marginal price is determined by the ability of the economy of a region, country or group of countries to pay for energy resources, since when the price of an energy resource reaches a certain marginal value, energy consumers, who in turn are producers of consumer and investment goods, will no longer receive an acceptable level of profit. The minimum price limit for energy resources is determined by the level of costs and the rate of acceptable profitability of energy companies. The ratio of marginal and forecast prices is shown in fig. 4.8.

Limit values of prices can be determined not only by an expert method, but also using macroeconomic modeling of the relationship between the economy and energy [43, 68, 85, 115, 118, 181].

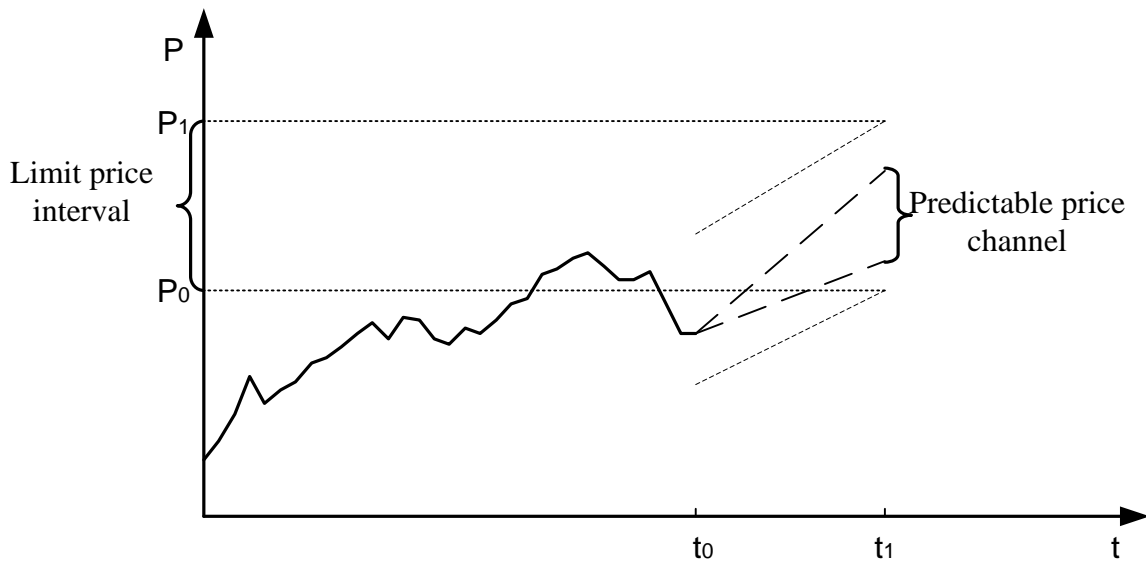


Figure 4.8 – The ratio of marginal and forecast prices for energy resources

Source: compiled by the author

The advantage of this method is a fairly high validity of the forecast. The disadvantage is the high cost, which does not always justify the accuracy. In addition, the use of macroeconomic modeling of the relationship between the economy and the energy sector becomes ineffective in conditions of high political instability and uncertainty (for example, an embargo on the export of energy resources from certain countries imposed by a political decision or military operations in the region of energy production can lead to a significant change in current prices), as well as in the context of active research in the development of technologies for the production and processing of energy resources (for example, new technologies for the production of natural gas from gas hydrate deposits can significantly increase the supply of natural gas on the market and lower its price) [7, 26, 41].

Returning to the considered problem of evaluating the effectiveness of investment projects in the energy sector, taking into account marginal prices for energy carriers, we note that if technical and economic indicators (such as prices for products sold) are given by intervals, then two NPV values are obtained in the calculations: the maximum, obtained at the most favorable conditions for the development of the situation from the point of view of investors, and the minimum,

obtained under the most unfavorable conditions for the development of the situation. To obtain a discrete value, which will characterize the project, two methods are used. The first method is used if the NPV probability distribution within the obtained interval can be given:

$$NPV = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} xf(x)dx \quad (4.13)$$

where  $x$  – NPV value within the interval;

$f(x)$  – probability distribution function NPV on the interval  $[NPV_{\min}, NPV_{\max}]$ .

Moreover, the probability distribution can be specified both with the help of an expert opinion and with the help of, for example, the Monte Carlo method.

The second method is used when the probability distribution of NPV values is not specified, and is based on the Hurwitz formula, which allows using the parameter  $\lambda$  in the decision-making process to find an intermediate option between extreme optimism and extreme pessimism of the decision maker:

$$NPV = NPV_{\max} \cdot \lambda + NPV_{\min} \cdot (1 - \lambda) \quad (4.14)$$

where  $\lambda$  – optimism-pessimism coefficient, usually taken equal to 0,3;

$NPV_{\min}, NPV_{\max}$  – minimum and maximum value of the net present value of the project.

When using in the analysis not only forecasted prices, but also their maximum allowable values, there are three options for the position of the project. In the first case, all possible energy prices lead to a positive economic effect, that is, in all cases, NPV is greater than 0. In fig. 4.9 shows the most preferred option in terms of sustainability and riskiness of the project.

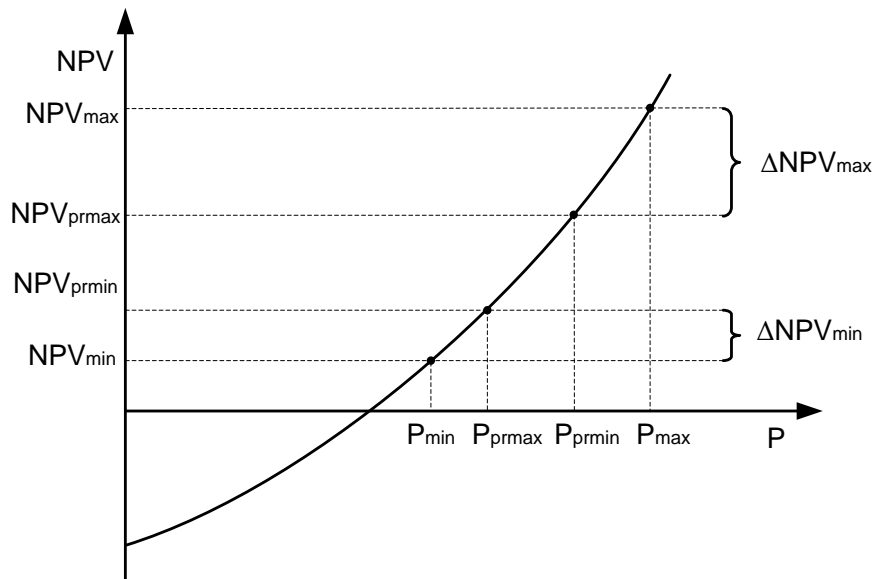


Figure 4.9 – Dependence of the NPV of the project on the price level for the energy resource (option 1)

Source: compiled by the author

On fig. 4.9. the following designations are used:  $P_{prmin}$ ,  $P_{prmax}$  – minimum and maximum expected price for an energy resource, respectively;  $P_{min}$ ,  $P_{max}$  are the minimum and maximum marginal prices for an energy resource, respectively;  $NPV_{prmin}$ ,  $NPV_{prmax}$  – project NPV values obtained at the minimum and maximum expected prices, respectively;  $NPV_{min}$ ,  $NPV_{max}$  are the NPV values of the project, obtained at the minimum and maximum marginal prices for the energy resource, respectively.

In the second case, NPV is less than 0 when the energy prices approach the minimum possible values (Fig. 4.10).



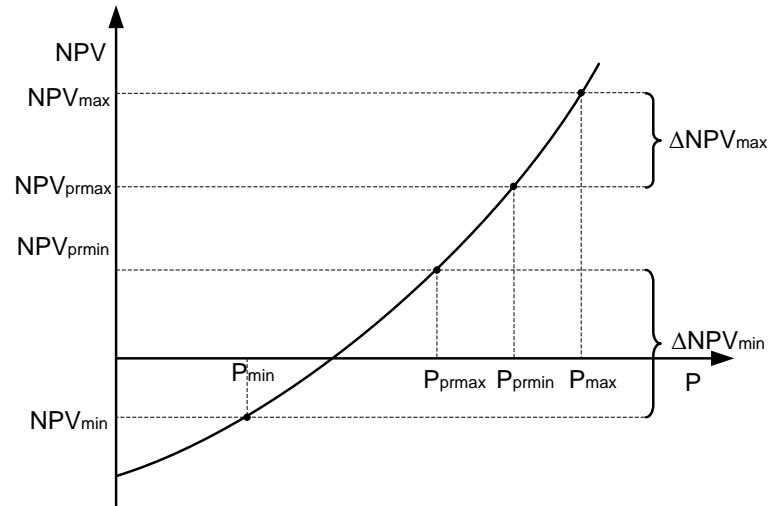


Figure 4.10 – Dependence of the NPV of the project on the price level for the energy resource (option 2)

Source: compiled by the author

In the third situation, NPV may already be negative when the minimum expected price is reached (Figure 4.11). In this case, the project is rejected as risky or accepted if, firstly, the investor takes an increased investment risk, and secondly, the expected NPV of the project is still greater than 0.

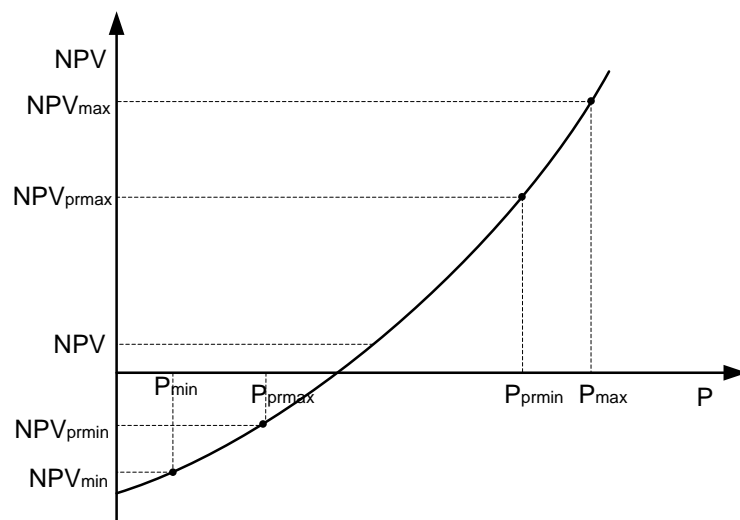


Figure 4.11 – Dependence of the NPV of the project on the price level for the energy resource (option 3)

Source: compiled by the author

To take into account the marginal prices for energy carriers when analyzing the effectiveness of investment projects in the energy sector, it is proposed to use the following method [102]:

$$NPV_{pl} = NPV_g + \Delta NPV_{\max} \cdot p_1 + \Delta NPV_{\min} \cdot p_2 \quad (4.15)$$

$$NPV_g = NPV_{pr \max} \cdot \lambda + NPV_{pr \min} \cdot (1 - \lambda) \quad (4.16)$$

$$\Delta NPV_{\max} = NPV_{\max} - NPV_{pr \max} \quad (4.17)$$

$$\Delta NPV_{\min} = NPV_{pr \min} - NPV_{\min} \quad (4.18)$$

where  $NPV_g$  – net present value calculated over the range of forecast prices;

$\lambda$  – optimism-pessimism coefficient, usually taken equal to 0,3;

$p_1, p_2$  – the probability that the NPV value falls into the zone between  $[NPV_{pr \max}; NPV_{\max}]$ ,  $[NPV_{\min}; NPV_{pr \min}]$  respectively.

If the NPV calculated by the proposed method is greater than 0, then the project is considered cost-effective. Using the proposed algorithm, it is possible to compare the economic efficiency of two or more investment options.

To calculate the final investment indicator  $NPV_{pl}$ , the proposed method combines the use of interval and probabilistic uncertainty. The interval uncertainty of a certain indicator assumes a given interval of its possible values - from minimum to maximum - without its probabilistic future values, that is, any value within the interval is assumed to be equally probable. In our case, the interval uncertainty characterizes the value of NPV in the interval  $[NPV_{\min}; NPV_{\max}]$ , since due to the high volatility of energy prices it is difficult to obtain objective estimates of the probability distribution. To find the point value of the net present value indicator, the Hurwitz formula given above is used.

During the analysis, the probability of NPV falling into the intervals  $[NPV_{pr \max}; NPV_{\max}]$ ,  $[NPV_{\min}; NPV_{pr \min}]$ . The assessment of probabilities is carried out by experts, taking into account socio-political, scientific and economic trends.

The proposed method makes it possible to increase the validity of investment decisions made in the energy sector by taking into account possible fluctuations in the market price of energy resources in their marginal values, which is quite likely in the current conditions of political and economic instability and uncertainty. To test the proposed option for calculating *NPV<sub>pl</sub>*, taking into account the marginal prices for an energy resource, we will consider one of the options for using the Kovykta gas condensate field. At present, it is planned to develop the huge reserves of natural gas in Eastern Siberia in order to meet the country's domestic needs, as well as to meet external demand. The development of the Kovykta gas condensate field should play an important role in this process.

The Kovykta deposit, discovered in 1987, is located 450 km. northeast of Irkutsk and 250 km. west of Lake Baikal, occupying an area of 7.5 thousand km<sup>2</sup> in the Zhigalovsky and Kazachinsko-Lena regions [177]. The main characteristics of the Kovykta deposit are presented in Table. 4.2.

Table 4.2 – Main characteristics of the Kovykta gas condensate field

Deposit area	7 499,5 km <sup>2</sup>
Depth (vertical)	2838 – 3388 m
Reservoir thickness	up to 78 m
Effective thickness	up to 29 m
Reservoir pressure	25.7 MPa
Reservoir temperature	55 °C
Condensate content	67 g/m <sup>3</sup>
CH <sub>4</sub> content in gas	90.3 mol%
Reserves category C1+C2	2.7 trillion m <sup>3</sup>

Source: [183, p. 64]

The Kovykta field is one of the largest gas condensate fields in Eastern Siberia and the Far East (Table 4.3). Its explored reserves make it possible to produce more than 30 billion m<sup>3</sup> of gas per year.

Table 4.3 - Composition of natural gas of the main fields of Eastern Siberia and the Far East

Name	Reserves, bcm (C1+C2)	Gas composition, %				
		methane	ethane	propane	butane	helium
Kovykta	2700	90,3	4,5	1,1	0,5	0,24
Verkhnechonskoye	95,5	83,1	5,8	2,1	1,0	0,5
Yurubcheno-Tokhomskoye	414,9	79,8	7,2	2,3	1,3	0,09
Omorinsky	8,8	77,1	7,5	3,3	1,4	0,09

Chayandinskoye	1240,9	85,1	4,7	2,0	0,7	0,5
Talakanskoye	54,1	85,9	5,6	2,0	1,0	0,5
Srednebotuobinskoye	170,5	87,0	3,7	1,3	0,4	0,5
Dulisminskoye	68,4	78,3	7,8	4,0	2,2	0,3
Sakhalin shelf (average)	1196,8	91,8	4,3	1,4	0,3	-

Source: [158, p. 69]

Various options for using the Kovykta gas condensate field are possible. In 2011, PJSC Gazprom received a license to develop the field. Currently, the company is carrying out pilot production of the field, having installed 7 wells. The company plans to drill 24 more wells in the near future. The strategic plans, according to the company's press service, include the launch of 514 production gas wells, which will allow to produce up to 25 billion m Chayandinskoye deposits with a length of about 800 km.

One of the additional options for using the Kovykta field, along with the extraction and processing of natural gas, is the option of building an export thermal power plant with an annual supply of up to 30–35 billion kWh of electricity to China [46, 139, 145]. Alternative options for the construction of export power plants are considered in the work of K. S. Smirnov [176]. The expansion of Russia's presence in international energy markets involves the export of electricity to China, which forms 25% of energy demand in Eurasia. China, being a leader in the growth of average annual electricity consumption, is interested in obtaining additional electricity to ensure its economic development. The export of electricity to China is justified from the standpoint of ensuring the energy security of Russia for the following reasons:

- export-oriented power generating capacities can act as a strategic reserve;
- in case of low demand from China, electricity can be directed to the domestic market of the country;
- the creation of new power generating capacities should contribute to solving the problem of increasing the reliability of power supply in Eastern Siberia and the Far East;
- the construction of a new thermal power plant will serve as an impetus for the socio-economic development of the region.

The data required to calculate the  $NPV_{pl}$  of a project for the construction of an export TPP with an annual supply of up to 30–35 billion kWh of electricity to China, taking into account the marginal prices for the energy resource, are presented in Table 4.4.

Table 4.4 – Initial data required to calculate the  $NPV_{pl}$  of the project for the construction of an export thermal power plant at the Kovykta field

Name	Unit	Min	Max
Generation tariff	cent/kWh	6,5	7,4
Demand (sale)	billion kWh	29,5	31
Gas price	USD/1000 m <sup>3</sup>	45	60
Capital investment	billion dollars	3,7	5

Source: compiled by the author according to [46, 134, 140, 171]

The discount rate is assumed to be 10%. The forecasting horizon is 26 years, reaching the design capacity by the fifth year of the project implementation. The results of calculations made to assess the economic efficiency of the TPP construction project, taking into account the marginal prices for electricity, are shown in Table. 4.5.

Table 4.5 – Results of calculations to evaluate the efficiency of the TPP construction project, taking into account the marginal prices for electricity

Probability $p_1/p_2$	$NPV_{pl}$	$NPV_g$	$\Delta NPV$ ( $NPV - NPV_g$ )	$NPV_{max}$	$NPV_{min}$
0,05/0,1	3,23	3,77	-0,54	8,05	-0,35
0,03/0,15	2,92	3,77	-0,85	8,05	-0,35
0,05/0,05	3,53	3,77	-0,24	8,05	-0,35

Source: compiled by the author

Calculations have shown that the expected net present value of the project ( $NPV_{pl}$ ), calculated taking into account the marginal prices, may differ significantly from the net present value ( $NPV_g$ ), calculated in the framework of the conventional approach, which assumes the adoption of energy resource prices within the most probable interval. In the case of the considered option of constructing an export TPP on the basis of the Kovykta gas condensate field, the option remains cost-effective

even if marginal prices are taken into account in the analysis process. However, when evaluating alternative investment options, taking into account marginal prices for goods sold can be important in making the final decision.

The need to take into account the marginal prices for energy resources in the process of evaluating the economic efficiency of the project corresponds to the ideas of N. Taleb about the problem of unaccounted for unlikely events: due to the low probability of their occurrence, they are discarded when making decisions, but if they are implemented, they can significantly affect the final result [337]. In conditions of high volatility in prices for energy resources, as a result of which even the most objective forecasts give incorrect estimates (analysis of forecasts of the dynamics of energy markets and their comparison with real changes can be found in [280]), the use of the method proposed above in order to increase the validity of investment decisions in energy is expedient.

#### **4.3. Macroeconomic consequences of long-term investment deficit in the electricity industry**

As shown in the first chapter, the lack of investment is one of the most important strategic threats to Russia's energy security, the implementation of which can have a significant negative impact on the country's economy and the quality of life of the population.

To assess the macroeconomic consequences of the lack of investment in the economy and the electric power industry, a set of models developed at Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (Fig. 4.12).

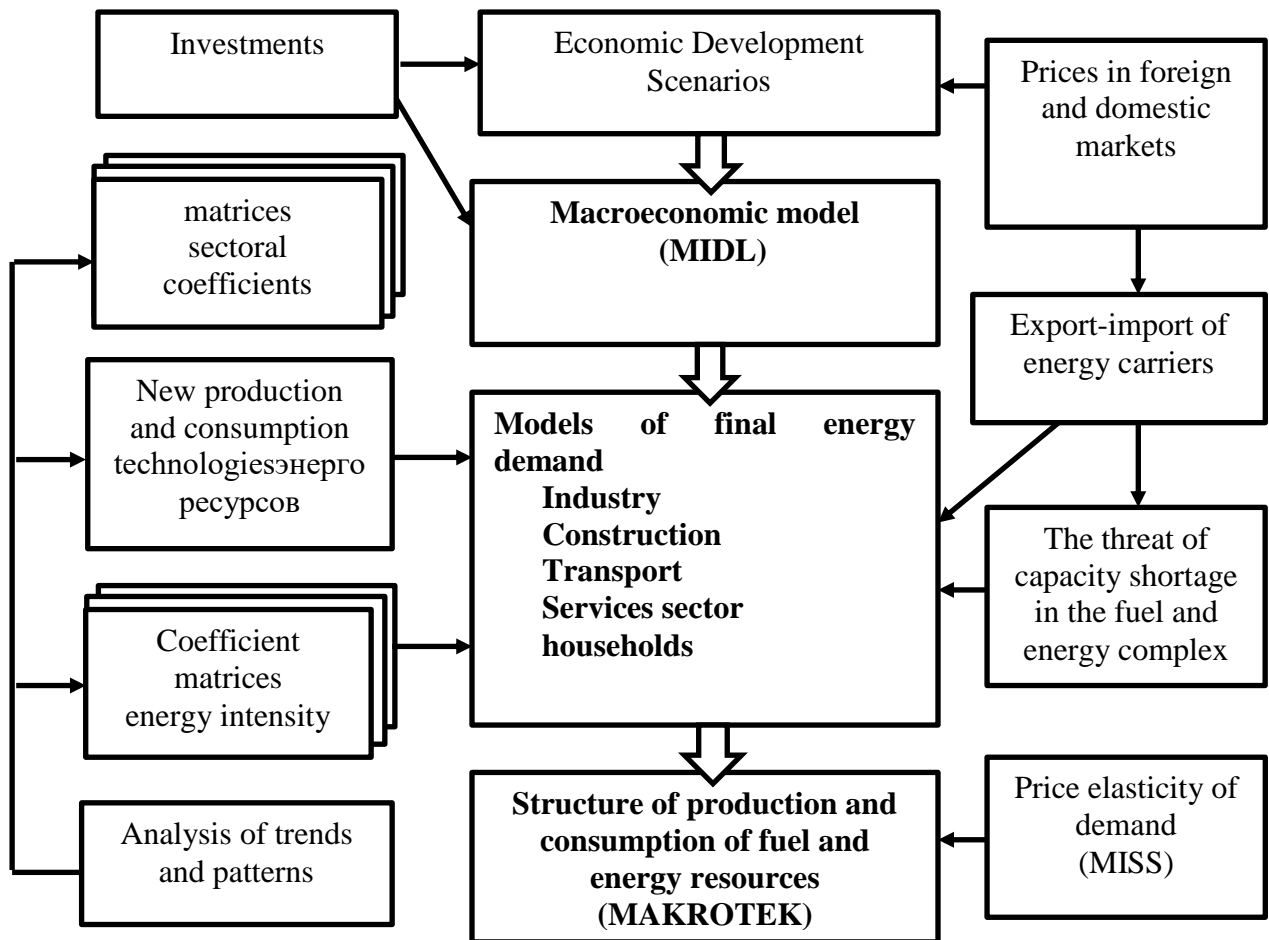


Figure 4.12 – Scheme for assessing the macroeconomic consequences and conditions for adapting the energy sector to different scenarios of economic development based on models developed at the ISEM SB RAS

Source: [110]

The MIDL macroeconomic model is used as the base model, which describes the dynamic relationships between key sectors of the economy, investment and export-import ties for a 10–20 year perspective. In this study, we used the latest version of the MIDL model, described in detail in the work of Yu. D. Kononov [68].

As a rule, for the purposes of long-term macroeconomic planning, several scenarios for the long-term development of the country's economy are considered, which differ primarily in the rate of GDP growth, the volume of final consumption and investment resources, the dynamics of population change, as well as the volume and structure of exports and imports. An intersectoral macroeconomic model is tuned to these indicators, and with its help, the dynamics of development of twenty-five

sectors of the economy corresponding to each scenario is determined. The sectors of the economy under consideration include: mechanical engineering, ferrous and non-ferrous metallurgy, chemical industry, timber industry, building materials industry, light and food industries, transport (gas pipeline, oil pipeline, road, rail, air, water transport), communications, construction, trade, services, other industries. The fuel and energy complex is represented by the electric power industry (the production of electricity and district heat is considered separately), oil and coal production, the gas industry (including main gas pipelines), and oil refining.

The energy simulation models estimate the demand for twenty-five economic sectors and non-manufacturing sectors in electricity, district heating and fuels. Information about the mutually agreed volumes of gross output of all industries comes from the macroeconomic model (MIDL), and the dynamics of changes in the coefficients of their energy intensity is determined separately for new and existing production capacities, taking into account retirement.

The MACROTEK model is a system of balance equations, which determines the volumes of production of various types of fuel and the structure of generating capacities to meet domestic demand for energy carriers and exports.

Below are the results of calculations and a quantitative assessment of the possible impact of reduced investment on the economy and energy consumption. Iterative calculations were preceded by adjustment of the intersectoral model of the economy to the basic scenario of economic and fuel and energy development with moderate average annual GDP growth rates for the period from 2020 to 2035 and investment volumes sufficient for sustainable economic development in the long term. This scenario is close in its parameters to the conservative scenario of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation. It has been extended for the future until 2035, taking into account the slowdown in economic growth in 2014–2016. According to the scenario, the demand for electricity compared to 2016 will increase by approximately 30% by 2025, by 41% by 2030, and by 46% by 2035 [110]. At the same time, the total consumption of fuel and energy resources (FER)



will increase very insignificantly due to the structural transformation of the economy and an active energy-saving policy (Table 4.6).

Table 4.6 – Main parameters of the base scenario for the development of the economy and the fuel and energy complex for the period up to 2035

	Unites	Report	Forecast		
		2016 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.
Population	million people	146,5	147	143	143
Living space	m <sup>2</sup> /person	24	25	27	31
GDP per capita	USD/person	14,2	20	25	30
Average annual growth rate to the base year					
GDP	%	-	2,9	4,0	3,5
Investments in fixed assets	%	-	4,0	4,3	3,6
Electricity consumption	billion kWh	1026,7	1330	1450	1500
Energy consumption	mln tce	1071	1150	1160	1165

Source: calculations by the author and Ph.D. O. V. Mazurova based on the data of the Forecast of the long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2030

Table 4.7 gives an approximate quantitative assessment of the possible negative impact of a decrease in investment resources in the manufacturing sector on the main macro indicators and energy consumption. It is shown that for each percentage reduction compared to the considered conservative scenario of the forecast of the Ministry of Economic Development in 2013, the annual volume of GDP may decrease by 0.3–0.4%, and the total production of fuel and energy resources by 0.2–0.3%. The calculations were carried out on the updated macroeconomic dynamic model MIDL. Against the backdrop of an increase in the share of worn out and obsolete equipment, a reduction in investments in the fuel and energy complex necessary for the development, modernization and technical support of the efficient operation of the energy sector can become a serious problem for the country's economy in general and energy consumers in particular.

Table 4.7 – Assessment of macroeconomic damage and reduction in the production of electricity and fuel with a reduction in investment in the production sector

Indicator	Decreased investment by 4%		Decreased investment by 7%	
	deviation , %	deviation, billion rubles	deviation , %	deviation, billion rubles
GDP	1,4	1140	3,0	2400
Gross output - total, including:	1,5	1160	3,1	4540
Industry	1,7	1160	3,2	2230
Construction	9,3	820	20,4	1840
Production				
Electricity	1,4	-	2,6	-
Primary energy resources	1,2		2,3	

Source: calculations by the author and Ph.D. O. V. Mazurova

The study showed that a decrease in the required volume of investments in the country's electric power industry compared to the baseline scenario can lead to a decrease in electricity supplies to consumers due to the appearance of a shortage of electricity in the domestic market. When making calculations, an assumption was made that the emerging shortage of electricity for domestic consumers will not be compensated by an increase in electricity imports.

The analysis carried out showed a significant negative impact of the shortage of generated electricity on the performance indicators of almost all sectors of the economy. So, for example, with a 1% power shortage of the required amount of electricity (approximately 15 billion kWh), the average annual losses in gross output amounted to 0.4-0.5%, industrial production - 0.7-1%, construction and assembly works - 1-1.1%.

Through industrial relations, the shortage also had a negative impact on the service sector, trade and the transport sector (Table 4.8).

Table 4.8 – Projected economic damage with a 1% electricity shortage in 2025

Industry	Deviation	
	Billion rubles	%
Total in the economy	520-550	0,4-0,5
Industry	400-420	0,7-1,0
Construction	90-100	1,0-1,1
Transport and communications	35-40	0,3-0,4
Trade and services	90-120	0,1-0,2

Source: joint calculations of the author and Ph.D. O. V. Mazurova

It is obvious that a further decline in investment and an increase in the shortage of electricity will lead to an increase in macroeconomic damage (Fig. 4.13).

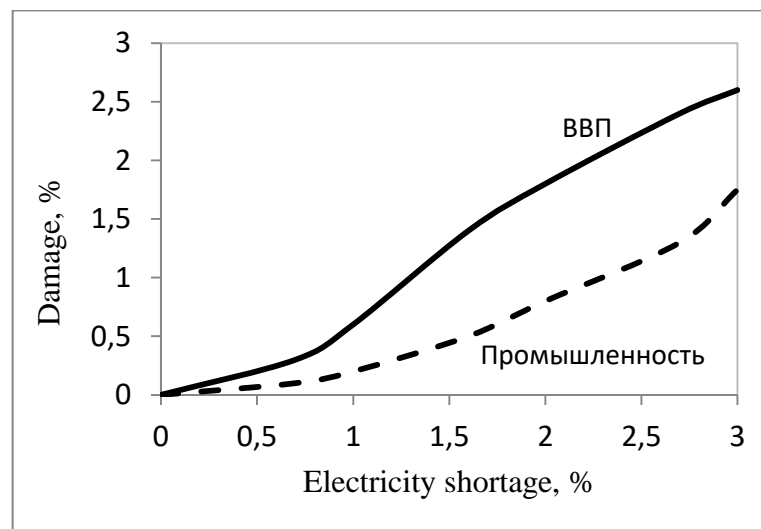


Figure 4.13 – Dependence of macroeconomic damage on the shortage of capacity in the electric power industry

Source: calculations by the author and Ph.D. O. V. Mazurova

The shortage of supplied energy resources inevitably leads to a lag in the development of national energy from the needs of the economy. If the development of the national energy sector lags behind the needs of the economy, the outstripping growth of the economy's energy needs over the growth in the production capacities of the fuel and energy complex will lead to an increase in energy prices, a slowdown in economic development and a decrease in the level of the country's energy security.

Prolonged underfunding of the electricity sector could lead to large-scale electricity shortages and adverse consequences in all sectors of the economy and the social sphere. As the study showed, the macroeconomic consequences of a long-term

deficit in the supply of energy resources grow non-linearly with an increase in its volume. Obviously, in this case, the overall macroeconomic damage could be much greater.

In the long term, the realization of the threat of short supply of energy resources by the national energy system may occur due to a number of fundamental reasons, ranging from insufficient investment in the country's fuel and energy complex to an accelerated pace of economic development. Thus, a quantitative assessment of the possible damage to the economy from a shortage of energy resources is necessary in the process of assessing the adaptability of the national energy system. In order to ensure the energy security of the country, it is necessary, firstly, to stimulate the growth of investment in the economy by creating a favorable investment climate, and secondly, to work out the issue of rationality and ways to increase the share of capital investments in the fuel and energy complex in the structure of investments in fixed assets in order to development of production capacities and transport networks of energy companies.

**Chapter conclusions.** Investments are a necessary resource that ensures the progressive development and transformation of the national energy system, which leads to an increase in its adaptive properties. Based on the developed principles of adding new elements and interconnections to the national energy system, the main ways of the positive impact of investments on the adaptive properties of energy systems were identified. Given the results of the research, criteria for investment projects evaluation in respect to their impact on the adaptive properties of the energy system were proposed.

The following features of large-scale investment projects in the energy industry were analyzed:

- significance of investment volumes and duration of implementation;
- significant impact on the financial and economic condition of the implementing company and its market capitalization;
- high social, political and economic significance for the industry, the region and the country as a whole;

- the presence of a feedback effect;
- a significant impact on the environment; high uncertainty in energy prices

To analyze the impact of investments on the level of energy systems adaptability, it is necessary to distinguish between the total flow of investments in the energy industry and individual large-scale investment projects as these two phenomena effect on the adaptive properties of the energy system differently.

The research of the adaptability property of complex dynamic systems made it possible to identify and describe the adaptability property of investment projects in the energy industry in the context of the impact of the implementation of individual large-scale investment projects on the adaptive properties of energy systems.

Since investment projects in the energy industry, as a rule, have a long implementation period, prices are set by a time-varying interval of expected values. In order to increase the validity of investment decisions in the energy industry, it is expedient to calculate the economic efficiency of investments with taking into account not only the expected minimum and maximum prices for energy resources, but also their maximum and minimum possible values. Limit prices, unlike expected prices, are determined not on the basis of supply and demand, but on the basis of the economic capabilities of energy producers and consumers to make transactions for the purchase and sale of energy resources. A method was proposed and verified for taking into account marginal prices for energy resources when analyzing the effectiveness of investment projects, which makes it possible to increase the validity of investment decisions made in the energy industry.

On the basis of a set of models developed at the Melentiev Energy Systems Institute (ISEM) of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, an assessment of the macroeconomic consequences of the lack of investment in the economy and the electric power industry was carried out. The analysis showed a significant negative impact of the shortage of generated electricity on the performance indicators of almost all industries of the economy.

The shortage of investments in energy industry inevitably leads to a lag of national energy industry capacity from the needs of the economy. If the development

of the national energy industry lags behind the needs of the economy, the outstripping growth of the economy's energy demands will lead to an increase in energy prices, a slowdown in economic development and a decrease in the level of the country's energy security. Long underfunding of the electricity sector could lead to large-scale electricity shortages and adverse consequences in all sectors of the economy and the social sphere. As the study showed, the macroeconomic consequences of a long-term deficit in the supply of energy resources grow non-linearly with an increase in its volume. Obviously, in this case, the overall macroeconomic damage could be much greater.

It is concluded that in order to ensure the energy security of the country, it is necessary to stimulate the growth of investment in the economy by creating a favorable investment climate, as well as to ensure an increase in the share of investment in the energy industry in the overall structure of investment in fixed assets in order to accelerate the development of production capacities and transport networks of energy companies.

## **CHAPTER 5. ENERGY SECURITY AS A FACTOR OF THE QUALITY OF LIFE IMPROVEMENT**

### **5.1. The impact of energy security threats on the quality of life**

One of the urgent problems of our time is the problem of ensuring long-term economic growth and the growth of the living standards of the population in the conditions of the depletion of traditional energy sources. The urgency of this problem is due to a number of both objective (exhaustibility of fossil fuels; rising costs for the extraction of primary energy resources; environmental degradation) and subjective (growing interest in the world in energy poverty, equal access to economic and social benefits, etc.) reasons. However, as shown by P. Tertsakyan [338], the aspirations of the world community to ensure long-term growth of the world economy and the quality of life of the population are difficult to satisfy within the framework of the use of existing energy technologies, economic management systems and energy “habits”.

The quality of life of the population is determined by many parameters and is characterized by diverse aggregate indicators: GDP per capita; the level of state social spending; the level of inequality in society (the most common indicator is the Gini coefficient); unemployment rate; the level of education of society; the level of environmental pollution; average life expectancy of the population, etc. In addition, along with the listed quantitative indicators, the quality of life of the population is determined by such qualitative characteristics as a sense of security and confidence in the future among the citizens of the country. A complete review of the content of the concept of "quality of life" is contained in the works of such authors as O. V. Glushkova [42], R. Costanza [226], D. Gasper [241], B. Lee [287]. At the same time, within the framework of considering the dynamics and factors of economic growth, as well as issues of the development of energy systems, the content of the concept of “quality of life of the population” is often narrowed down to its economic aspects, characterizing it by the value of GDP per capita (well-being level).

An increase in the quality of life of the population, other things being equal, is directly related to an increase in energy consumption, which is illustrated in the

works of J. Lambert [282], L. Lee [288], K. Pasten [317]. As shown in the article by K. Zou [362], active long-term global economic growth, accompanied by a rapid growth in the consumption of energy resources, began with the industrial revolution. However, it should be noted that at present, due to new technologies that ensure the growth of energy efficiency in the processes of transformation, transportation and consumption of energy resources, the growth of world wealth is going at a faster pace than the growth of energy consumption. Thus, the article by E. V. Galperova and O. V. Mazurova [37] provides data that the energy intensity of the world economy decreased by 32% from 1990 to 2015, and the actual volume of consumed primary energy resources over the same period increased by 61%. At the same time, a direct relationship between the volume of energy consumption and the quality of life of the population remains: the higher the level of energy consumption, the higher the standard of living of the population.

At present, the discourse of the problem of ensuring the growth of the quality of life of the population has been expanded with questions of the quality and security of the supply of energy resources. A disruption in the supply of energy resources can vary both in terms of the time of deployment (short-term or long-term) and the nature of interruptions in supply (a decrease in the level of supply of energy resources or their complete cessation). As shown in the work of A. Mayer and E. Smith [303], there is a direct relationship between the quality of life of the population and the level of national energy security. However, the analysis of this relationship is reduced mainly to the analysis of the negative social, economic and other consequences of reducing the supply of energy resources for the population (as done in the works of E. Mazur [304], R. Nadimi [311, 312], D. Hernandez [254], etc.) without taking into account the probability of their reduction, that is, the threats to energy security are not considered as risks of reducing the quality of life of the population. Meanwhile, the relationship between the standard of living of the population and the level of energy security is characterized not only by the level of production and consumption of energy, but also by the likelihood of its unfavorable change in the future. Thus, considering threats to energy security as risks of reducing the quality of life of the



population as a result of a decrease in the supply of energy resources can contribute to the expansion and development of tools for assessing the level of energy security and developing measures to improve it, which will positively affect the quality of life of the population.

A quantitative assessment of the risk of reducing the quality of life of the population due to the implementation of threats to energy security in the general case can be carried out according to the following formula:

$$r = c \cdot p \quad (5.1)$$

where  $r$  is the risk of reducing the quality of life of the population due to the implementation of threats to energy security;

$c$  - damage to the economic well-being of the population;

$p$  is the probability of realization of threats to energy security.

The economic damage that reduces the quality of life of the population manifests itself in different ways depending on whether current or strategic threats are realized [106]. A sharp decline in the quality of life of the population may be due to a sudden interruption in the supply of energy resources as a result of the implementation of such current threats as accidents, a sharp deterioration in weather conditions (especially typical for the regions of the Far North), adverse socio-political phenomena (for example, the introduction of an embargo), etc.

A short-term interruptions in the supply of energy resources do not actually lead to a long-term decrease in the quality of life of the population, but have a negative short-term impact directly through the reduction or complete cessation of services and goods supplied to the population.

A long-term decline in the quality of life of the population (or a slower improvement in the quality of life of the population than potentially possible, as well as in comparison with competing countries) occurs as a result of the implementation of strategic threats to energy security, leading to a shortage of energy resources or an increase in energy prices, which slows down the economic growth.

In the current geopolitical and socio-economic situation, the most significant strategic threats to Russia's energy security are:

- lack of investment in generating capacities, caused by such circumstances as a decrease in the investment attractiveness of the Russian economy, limited access of domestic energy companies to international capital markets and to foreign technological developments in the field of hydrocarbon production;
- shortage of generating capacities;
- uneven regional development of generating capacities;
- excessive rise in prices for energy resources, causing a slowdown in economic growth in the country.

As shown above, the listed strategic threats to energy security are interconnected: insufficient investment in the development of the country's fuel and energy complex due to an unfavorable investment climate leads to a shortage of generating capacities and, as a result, to an increase in energy prices and a slowdown in economic growth.

In the long run, the economic and social damage caused by the realization of strategic threats to energy security has the nature of missed opportunities. It is the realization of long-term threats to energy security that leads to protracted, hard-to-correct consequences of a decrease (or insufficient growth) in the quality of life of the population. Since strategic threats to energy security are complex phenomena that affect various aspects of socio-economic activity and create self-reinforcing processes with positive feedback (Fig. 5.1), their impact on the standard of living of the population is complex and extended over time.

The quality of life of the population is directly affected not only by the implementation of strategic threats to energy security, but also by the conditions in which these threats are realized. For example, international sanctions against Russia (in particular, restrictions on access to international capital markets), creating unfavorable conditions for the functioning of the domestic economy and, thereby, reducing the level of well-being of citizens, may lead to the realization of such a

strategic threat as excessive growth in energy prices, which will also reduce the quality of life of the population over time.

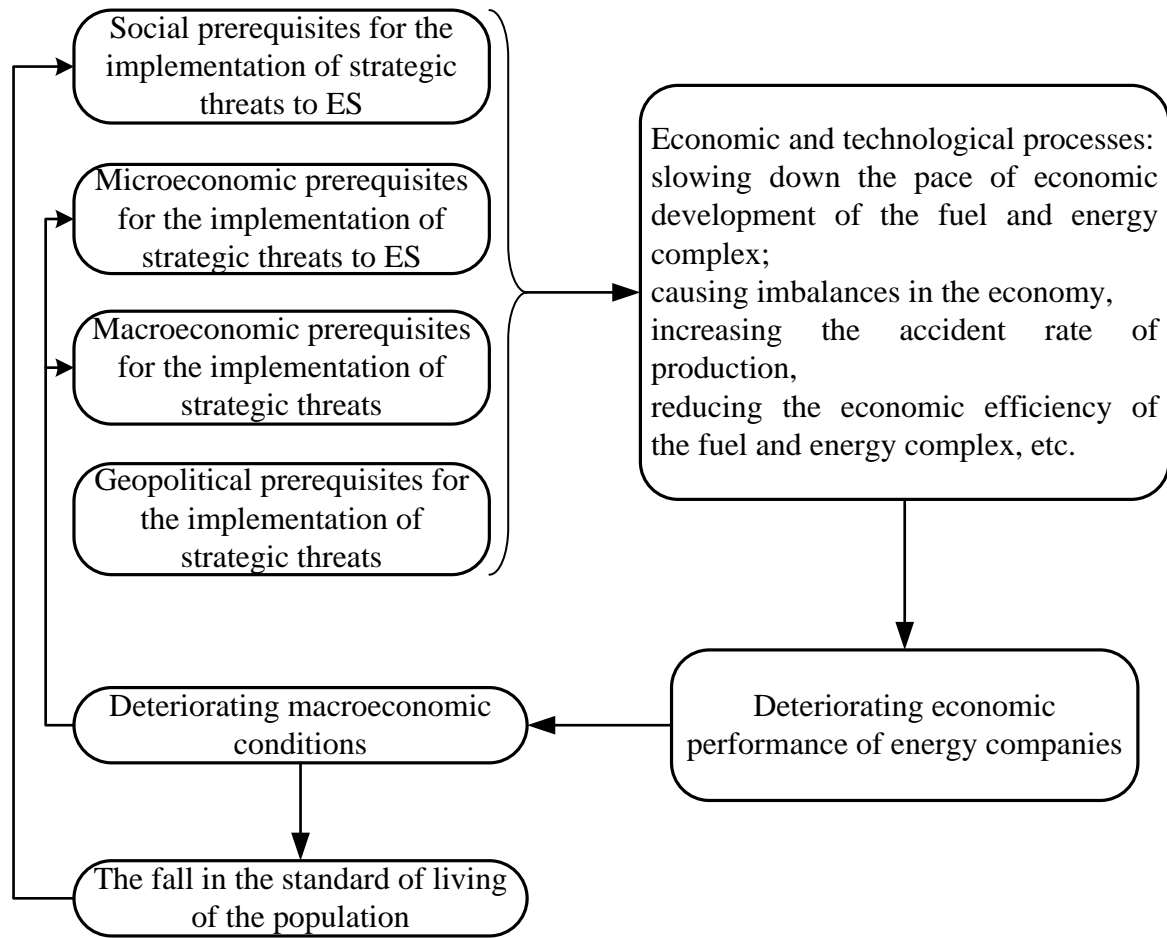


Figure 5.1 – The general scheme of the self-intensifying process of the emergence and implementation of strategic threats to energy security in the context of a decrease in the quality of life of the population

Source: compiled by the author

Most socially and economically developed countries are net importers of energy resources, which leads to the fact that most approaches to the analysis of the problem of ensuring the growth of the quality of life of the population consider the consumption of energy resources as the basic costs of society, accompanied by negative external effects (such as environmental pollution). ). I. S. Belik and L. V. Kamdina adhere to this approach to the energy consumed by society as a net cost of society [16], who analyze the dynamics of household income and consumer spending.

At the same time, it can be argued that for energy exporting countries, for which energy resources are the most important object of foreign trade operations, serving as a source of additional government revenue, the relationship between the volumes of produced and consumed energy resources and the quality of life of the population is more complex. Thus, in conditions when the fuel and energy complex is the main source of export earnings, while accounting for about a quarter of the country's GDP, the volume of production of energy resources and the efficiency of domestic energy companies affect the quality of life of the population not only through the amount of energy consumed domestically, but also through income, received from the export of hydrocarbons, since the more fuel and energy resources are produced and sold both in the domestic and foreign markets, the higher the state revenues and the more funds the state has to spend on the social needs of the population.

For countries importing energy resources, the following functional relationship can be distinguished between the standard of living of the population (QoL), the volume of energy consumption (EC) and the level of technological progress (T), which reduces the energy intensity of the economy:

$$QoL = f(PS, EC, T) \quad (5.2)$$

Where *PS* – population size.

Two factors act in different directions on the volume of energy consumption (Fig. 5.2):

- the volume of goods and services consumed, which directly determines the amount of energy consumed;
- scientific and technological progress that increases the efficiency of energy consumption and, thus, reduces the energy intensity of the economy [111].

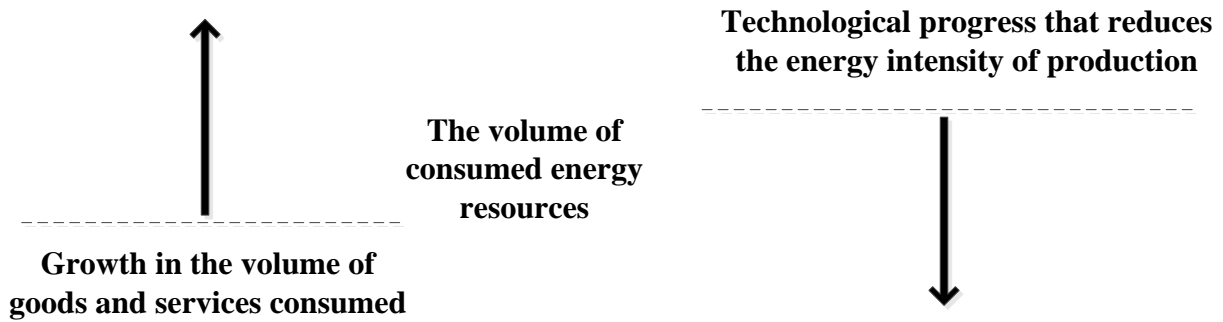


Figure 5.2 – Factors that determine the amount of energy consumed

Source: compiled by the author

For countries that export energy resources, the dependence of the quality of life of the population on the level of production and consumption of energy resources has more basic variables that increase domestic effective demand and create conditions for economic growth:

$$QoL = f(PS, EC, T, x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (5.3)$$

where  $x_1$  – taxes and fees received by the state from exported energy resources;

$x_2$  – expenses of energy companies on the wages of employees involved in the extraction, processing and transportation of export energy resources;

$x_3$  – investment expenses of energy companies made in the domestic market (that is, the purchase of domestic equipment and the provision of services in the domestic market);

$x_4$  is the profit of energy companies from foreign trade operations, distributed within the country.

Parameters  $x_1, x_2, x_3, x_4$  are interrelated variables determined by such parameters as the volume of demand for energy resources in the international market, energy prices, the dynamics of growth in the production potential of domestic energy companies, etc. However, their selection is necessary to analyze the situation and develop comprehensive socio-economic measures aimed at improving the living standards of the population through the realization of the potential of the national energy system. Thus, the above dependence can be represented in an aggregated form:

$$QoL = f(PS, EC, T, X) \quad (5.4)$$

where  $X$  – total company income from foreign trade activities of national energy companies.

If the variables affecting the quality of life of the population are taken as constants, then the economic well-being of the society will increase (or decrease) in proportion to the increase (decrease) in total income  $X$  by the value of the multiplier, since this increment ( $\Delta X$ ) is actually the initial increase in effective demand, triggering a cyclic process of domestic supply growth and income growth:

$$\Delta Y = Y_1 - Y_0 = k\Delta X \quad (5.5)$$

where  $\Delta Y$  – change in the total income of society (economic well-being);

$k$  is a multiplier.

Thus, in the  $i$ -th year, the level of quality of life of the population can be defined as:

$$QoL_i = Y_i PS_i^{-1} \quad (5.6)$$

Since the multiplier effect operates both with an increase and a decrease in the basic parameters, the risk of a decrease in the quality of life of the population due to the implementation of strategic threats that worsen the economic efficiency of national energy companies can be assessed using the formula:

$$r = p\Delta Y = pk\Delta X \quad (5.7)$$

where  $k\Delta X$  – negative consequences of the implementation of threats to the development and functioning of domestic energy companies, leading to a fall in the total income of the state.

To compare the significance of threats to energy security for different regions or for one region in different periods of time, it is necessary to correlate the risk of a decrease in the quality of life of the population with the level of basic aggregate income ( $Y_0$ ):

$$CR = rY_0^{-1} \quad (5.8)$$

The higher the value of the CR coefficient, the higher, other things being equal, the relative magnitude of the consequences of the risk of reducing the quality of life of the population due to the implementation of strategic threats to energy security.

Using the proposed scheme for assessing the consequences of the risk of reducing the quality of life of the population due to the implementation of strategic threats to energy security, as well as the results of assessing the macroeconomic consequences of the implementation of such a strategic threat to energy security as the lack of investment in the electric power industry, given in the fourth chapter of the dissertation research, the following results were obtained. The fall in household income in the long term (assuming the current population size and income distribution structure is maintained) will be up to 2.7% (with a 4% investment deficit) and up to 5.76% (with a 7% deficit). The value of the multiplier used for the Russian economy was taken in the article by I. E. Zyablitsky [55].

The general scheme for assessing and analyzing the risks of reducing the quality of life of the population due to the implementation of threats to energy security is shown in fig. 5.3. As shown above, in the context of the presence of large hydrocarbon reserves in the long term, the most relevant for Russia are the threats of a reduction in the efficiency of the functioning of national energy companies and a decrease in their income from foreign trade operations, rather than a drop in the volumes of energy resources actually consumed on the domestic market. Therefore, the above method for assessing the risks of reducing the quality of life due to the implementation of strategic threats to energy security may not include the possibility of a sharp and long-term reduction in supplies to the domestic market, that is, take into account only a set of parameters  $\{x_i\}$ .

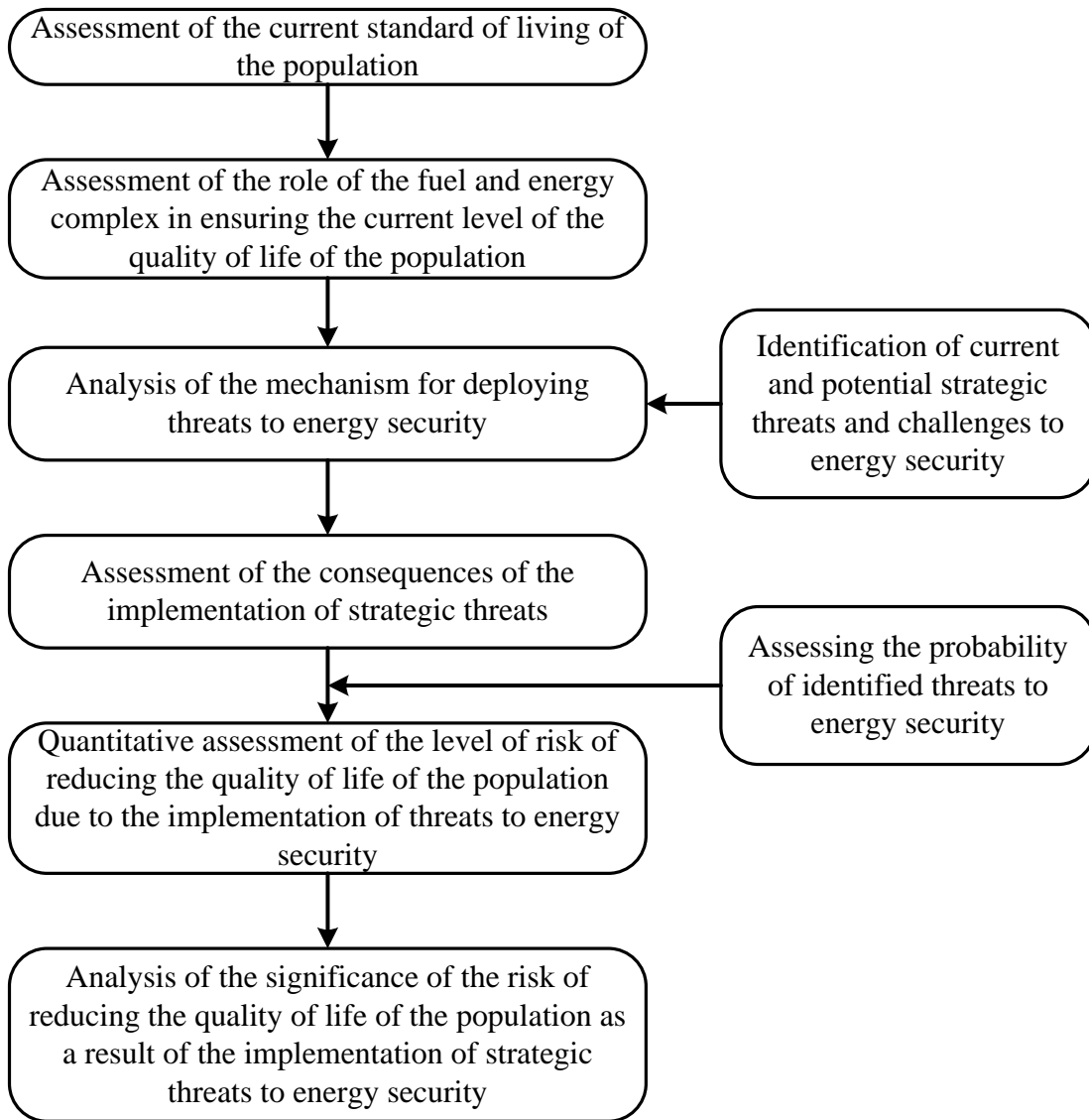


Figure 5.3 – Algorithm for assessing the risks of reducing the quality of life of the population due to the implementation of threats to energy security

Source: compiled by the author

Provided that the country has favorable institutional conditions for the development of industry, the multiplier effect will contribute to the development of not only energy systems, but also related sectors of the national economy, which leads to an increase in the  $x_3$  variable. In this context, the development of import substitution not only increases the level of national security, but also has a positive impact on the quality of life of the population. Thus, due to the special economic role of the fuel and energy complex in the structure of the national economy, the mechanism of the influence of strategic threats to the energy security of the country



on the level of the quality of life of the population can be realized both in the direction of an unfavorable change in the volume of fuel and energy resources consumed in the domestic market, and in the direction of a deterioration in the dynamics of development of individual domestic energy companies and large energy systems (Fig. 5.4).

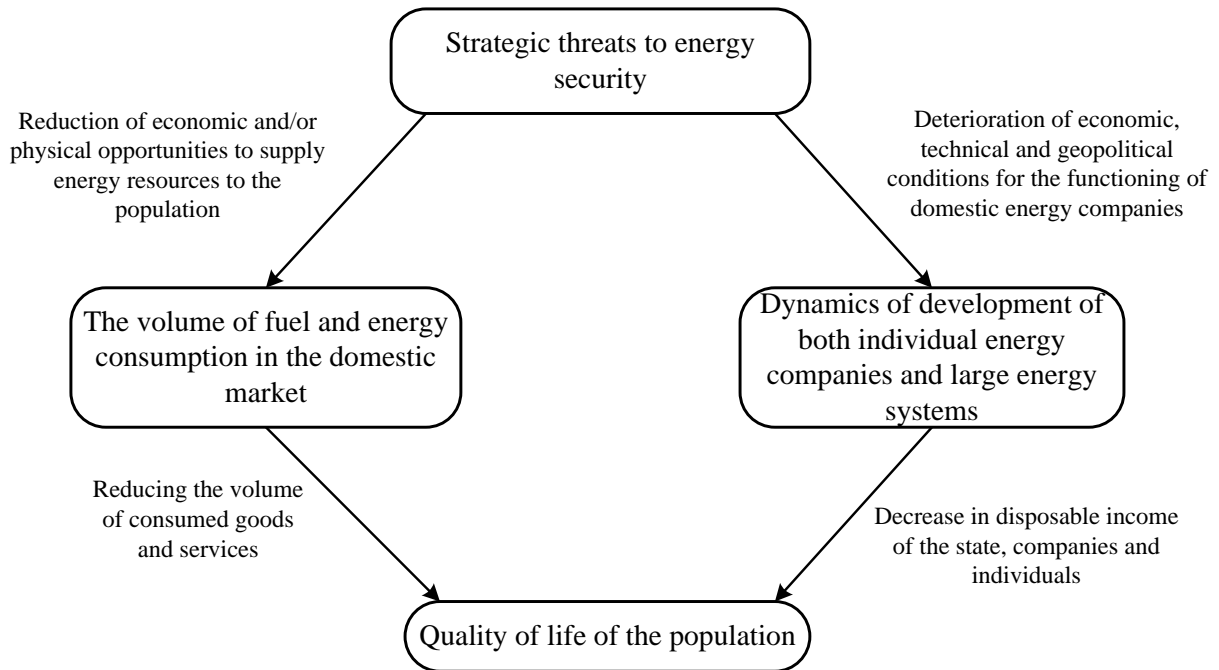


Figure 5.4 – The mechanism of influence of the implementation of strategic threats to energy security on the quality of life of the population

Source: compiled by the author

To improve the quality of life of the population and reduce the risks of its unfavorable change, it is necessary not only to increase the production potential of energy companies whose products will be exported, but the integrated development of energy systems [202, 271, 284]. Increasing the production potential of the domestic fuel and energy complex through extensive measures does not reduce the likelihood of strategic threats and, other things being equal, does not reduce the negative consequences of their implementation, while the introduction of measures for the intensive development of energy systems may be accompanied by mitigation of the risks under consideration. Below is a table of the main possible measures aimed at the development of both individual energy companies and energy systems,

which in the medium and long term will, on the one hand, reduce the likelihood of strategic threats to energy security that negatively affect the well-being of the population, on the other hand, reduce the magnitude of negative socio-economic consequences in the event of the implementation of these threats (Table 5.1).

Table 5.1 – The main economic and technical measures that reduce the risks of reducing the quality of life of the population in the event of the implementation of strategic threats to energy security

Period	Reducing the likelihood of strategic threats to energy security	Reducing the impact of the implementation of strategic threats to energy security on the quality of life of the population
Short term	Increase in reserve capacities; diversification of suppliers of energy resources; development of interconnections that increase the possibilities of electricity flows; expansion of transport infrastructure.	Increasing the flexibility of organizational structures of energy companies; introduction of Smart Grid technologies, which allow quickly identify the reasons for the reduction or interruption of power supply.
Long term	Development of distributed generation; diversification of sources of energy resources; improving the investment climate by improving the regulatory framework.	Reducing the energy intensity of the economy; development of associated fuel and energy industries; diversification of international markets for energy resources.

Source: compiled by the author

Stakeholders in mitigating the risks of reducing the quality of life of the population are both the owners and managers of energy companies, who are interested in more efficient and stable operation of their organizations, and the government of the country, focused on supporting the interests of the whole society. In this regard, measures aimed at mitigating the risks of a decrease in the quality of life of the population as a result of the implementation of threats to energy security should be carried out as part of the implementation of the state energy policy.

The development of an approach to the study of strategic threats to energy security as risks of reducing the quality of life of the population has both practical and theoretical significance. The expansion of scientific knowledge about the role of energy resources and energy systems in the process of ensuring the growth of the quality of life of the population in modern conditions is especially important for

Russia with its developed fuel and energy complex and a large supply of hydrocarbons. The identification and analysis of the risks of reducing the quality of life of the population as a result of the implementation of threats to energy security, as well as the study of the mechanism of their influence on the level of economic well-being and the quality of life of the population will ensure the development of methodological tools to reduce the risks of the implementation of strategic threats to the energy security of the country and assess its level. The development of methodological tools, in turn, will contribute to the development of more effective measures aimed at increasing the resilience of the fuel and energy complex to strategic threats to energy security that can have a negative impact on the quality of life of the population, as well as the integration of these measures into the country's socio-economic development programs.

## **5.2. Reducing the impact of energy security threats on the quality of life by the development of sustainable energy**

The problem of the impact of the implementation of threats to energy security on the quality of life of the population raises the question of the need to solve the problems of ensuring energy security within the entire socio-economic system, and not only within the national energy sector [108]. Strategic threats to energy security generate a negative impulse passing through intersystem links from element to element of the country's economic system, including energy, and interaction links between elements of subsystems. Or, in other words, commodity and financial chains transmit the negative impulse generated by this or that adverse event, leading to a decrease in economic activity and a decrease in the level of well-being of citizens. Within the framework of the economic system, there is either a fading or strengthening of the negative initial impulse caused by the realization of one or another threat to energy security. The impulse increases when, due to the inefficient operation of the system, it accelerates internal destructive processes, leading to a decrease in the quality of life of the population. The negative impulse may have a different nature, but ultimately it has a negative impact on the quality of life of the

population, leading to a decrease in both real disposable income and economic growth rates.

The propagation of a negative impulse does not occur unidirectionally (linearly) from one segment to another. Getting into the next segment of its impact, the impulse changes and, along the chains of intersystem connections, initiates new negative changes in the segments of its initial distribution (Fig. 5.5). However, to identify weaknesses in which the greatest increase in the negative effect of the implementation of threats to energy security occurs, this process can be simplified and presented as a one-way process.

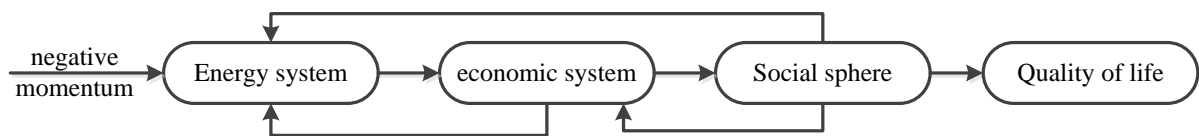


Figure 5.5 – The process of propagation of an impulse formed by a negative phenomenon

Source: compiled by the author

The destructive effect of a negative impulse can increase at different rates in different segments of the socio-economic system. On Figure 5.6 conditionally displays the strengthening of the negative influence (E) of the initial impulse formed by one or another adverse event as it propagates from element to element over time (t). The slope of the curve depends on in which of the segments internal contradictions and negative tendencies increase the negative effect to a greater extent.

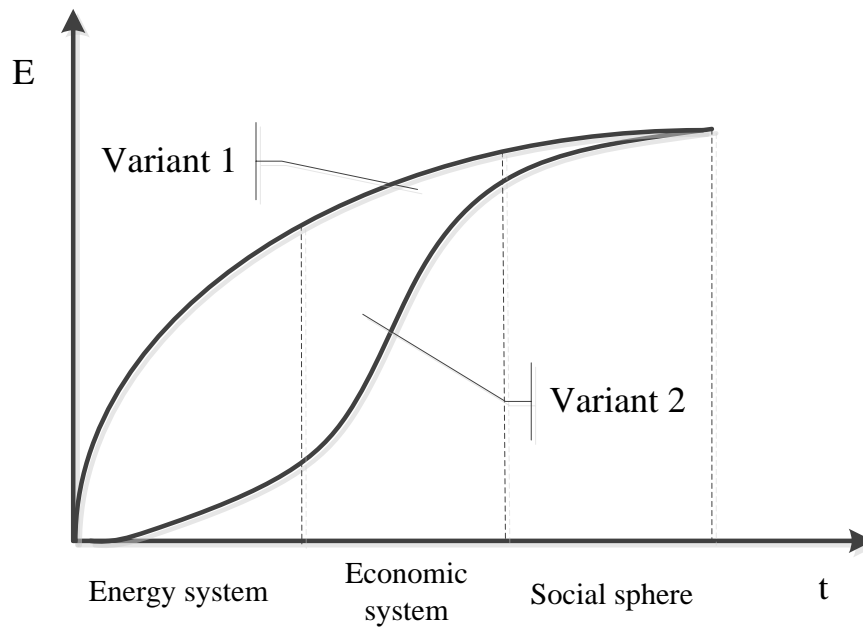


Figure 5.6 – Dynamics of the total negative effect (E) obtained as a result of impulse propagation

Source: compiled by the author

As can be seen from fig. 5.6, in the first variant of the curve, the greatest increase in the negative effect of impulse propagation occurs in the energy sector, while in the second variant, the largest increase in the negative effect of impulse propagation occurs in the economic system. It is possible to single out some factors related to these segments that increase the negative impact of a stressful event (Table 5.2).

Table 5.2 – Factors that increase the negative effect of the passage of an impulse in different segments of the national economy

Factors that increase the negative impact of a stressful event	Characteristics of the influence of the selected factors on the dynamics of the spread of a negative impulse
Energy system	
High degree of depreciation of energy facilities	The growth of accidents, the growth of production costs, the decrease in economic efficiency.
Low bandwidth interconnection	As a result of the disruption of certain supply chains of energy resources, the likelihood of a shortage of energy resources sharply increases.
Low overhead	In the event of an increase in peak loads, the likelihood of a sharp increase in energy prices increases.
High level of market monopolization	Energy companies will be inclined to solve all negative situations not at the expense of internal resources, reorganization and improvement of their efficiency, but at

	the expense of rising prices and lowering the quality of supplied energy resources.
Economic system	
High energy intensity of the economy	Rising prices for energy resources will lead to a significant reduction in the competitiveness of the national economy.
A large share of the fuel and energy complex in the structure of the economy	Decrease in demand and prices for energy resources in the world markets, imposition of sanctions against domestic energy companies, etc. lead to a sharp decline in business activity due to a fall in aggregate demand.
Low investment attractiveness of the country's economy as a whole	High risks of investing in the country lead to a shortage of funding for national energy companies, which in turn, in the event of a stressful event, accelerates the process of obsolescence of energy facilities, increases the accident rate and reduces the production potential of the country's fuel and energy complex.
Insufficient level of development of the national financial market	Energy companies cannot make full use of financial market instruments that allow them to attract financial resources for the implementation of anti-crisis measures.
Social system	
High level of social inequality	As a result of the implementation of threats to energy security, less protected sections of the population will suffer, which will worsen the socio-economic situation and reduce the investment attractiveness of the country.
Low labor mobility	In the event of structural changes in the economy resulting from the realization of threats to energy security, the processes of finding a new equilibrium state will slow down, creating additional economic damage both to the country's economy as a whole and to individual households.
High level of corruption	It reduces the efficiency of the functioning of the country's economy and, as a result, the efficiency of the system's response to the implementation of threats to energy security.

Source: compiled by the author

Table 5.2 shows that the lower the production and economic efficiency of energy companies, the higher the monopolization of the energy market, the lower the quality and quantity of interconnections, etc., the higher the destructive effect of the implementation of a strategic threat in the energy system, leading to a decrease in the level of welfare of citizens.

When the energy sector plays a leading role in the national economy, production activities are poorly diversified, and many manufacturing firms operate with a low “margin of safety” (have a high break-even point), then the negative processes caused by the realization of threats to energy security lead to an avalanche effect, expressed

in the fall in aggregate demand and business activity. The social sphere can enhance the destructive effect of a negative impulse, primarily through a high level of social inequality, low labor mobility and a high level of corruption, which leads to a decrease in the adaptive mechanisms of the economy to crisis phenomena.

Ensuring energy security in the framework of reducing the impact of the implementation of strategic threats to energy security on the quality of life of the population is possible through the formation and implementation of a comprehensive energy and economic policy aimed at creating such socio-economic and financial conditions that will level the destructive effect of adverse stress phenomena [104].

Comprehensive socio-economic development, which allows solving the problem of ensuring energy security by increasing the adaptive properties of energy and economic systems, reducing the sensitivity of the level of well-being of citizens to stresses of various nature, etc., can be ensured within the framework of the concept of sustainable development (sustainable development) [291].

The first generally accepted definition of the term sustainable development was given in the report "Our Common Future" by the World Commission on Environment and Development (WCED) in 1987 [353]. Sustainable economic development is defined as development in which the current needs of society are met without reducing the ability to meet the needs of future generations. The concept of sustainable development, in the definition of WCED, imposes restrictions on current consumption not in absolute unchanged terms, but depending on the existing level of technological development and social organization. The development of technology and the evolution of social organization expand the possibilities of society in terms of current consumption, without prejudice to the interests of future generations. To date, the interpretation of the concept of "sustainable development" has expanded significantly. In 2016, the working group of the UN General Assembly on sustainable development goals prepared a report ("17 Sustainable Development Goals"), which formulated the tasks that contribute to the achievement of sustainable development: combating poverty in all its forms around the world; ensuring food security; ensuring the availability of affordable, reliable, sustainable and modern energy supplies to the

public; ensuring sustainable economic growth; combating climate change and its consequences; rational use of natural resources, etc. The content of the concept of sustainable development began to include not only the preservation of the existing state of affairs, but also the restoration of damage caused by society to the environment. It should also be noted that only a few scientists share the concepts of “sustainable development” and “sustainability”, linking “sustainable development” mainly with economic development, and “sustainability” with ensuring the environmental security of countries and the world as a whole [231]. Most of the world's researchers use these concepts as synonyms.

Within the framework of the concept of sustainable economic development, a number of scientists formulated the principles of such development, integrated into the practice of solving social, economic and environmental problems by many governmental and non-profit organizations around the world [243, 263, 281]:

1. The principle of interconnectedness. According to this principle, development should be carried out taking into account the environmental, social and economic consequences of certain political decisions.

2. The principle of social responsibility of commercial companies, which implies their active participation in the implementation of socially important programs that contribute to the achievement of balanced development.

3. The principle of global responsibility. Balanced development can only be achieved at the global level, which involves the pooling of financial, scientific, energy and other resources of the world community.

4. The principle of scientific solution of current social, economic, energy and political problems.

5. The principle of equality within one generation and between different generations in terms of access to resources and opportunities to meet their needs.

Thus, the concept of sustainable development can be defined as the concept of balanced development, aimed at balancing the interests of present and future generations, balancing the interests of society and the environment, balancing the interests of various representatives of society, etc. Despite the fact that the concept of



sustainable development is still in its infancy, the very fact that this concept enters modern scientific and political discourse has a positive effect on management practice.

One of the key factors in achieving sustainable development is the functioning of sustainable energy. Sustainable energy provides an energy that satisfies the current energy needs of society without reducing the ability to meet future energy needs [188, 268, 330]. The International Energy Agency defines sustainable energy as energy that takes into account the balance between energy security, economic development and environmental protection [235].

At the current level of scientific, technical and social development, the possibility of the transition of the energy sector, and after it the economy, to a new paradigm of functioning is becoming real. In the most general form, the transformation of the existing energy structure is characterized by fundamental changes in the energy system associated with the transition to new types of fuel and energy conversion technologies. Historically, the transition to a new energy order has always been associated with the transition to a new dominant type of energy resources (from wood to coal, from coal to oil, from the absolute dominance of oil in the global energy balance to an increase in the share of natural gas used) and the emergence of appropriate energy technologies. The transition to sustainable energy involves the introduction and dissemination of many different new technologies (including information) and a significant diversification of the energy balance, combined with a more efficient use of hydrocarbons.

The concept of sustainable energy is also at the stage of its formation: in the works of foreign scientists, complex, comprehensive studies of the structure, dynamics and patterns of development of sustainable energy are rarely found. When studying energy issues in the context of sustainable development, researchers often focus on narrower issues: the development of renewable energy sources, ways to reduce greenhouse gas emissions, increase the energy efficiency of the economy, strengthen energy security, etc.

The question of the timing of the transition to sustainable energy remains open [331, 333]. First of all, there is no consensus on what point in the future can be characterized as the point of transition to sustainable energy. The already mentioned report of the UN General Assembly (“17 Sustainable development goals”) indicates about 230 indicators for achieving sustainable development, five of which relate to sustainable energy:

1. Ensuring universal access to affordable, reliable and modern energy services.
2. A significant increase in the share of renewable energy sources in the global energy balance.
3. Doubling the global rate of improvement in energy efficiency.
4. Strengthening international cooperation to facilitate access to green energy research and technology, including renewable energy, advanced and cleaner fossil fuel technologies, and promoting investment in energy infrastructure and clean energy technologies.
5. Expansion of infrastructure to provide modern and sustainable energy services.

The need to establish sustainable energy in Russia is determined by the need to solve the problems of ensuring the energy security of the country, since it is new technologies, organizational structures and the internal logic of the development of sustainable energy, based on the diversification of energy sources, the development of distributed generation, increasing the efficiency of processing energy resources and introducing an active consumer into electric power system, increase the adaptive properties of both energy systems and the economy as a whole. Thus, as noted in [155, p. 46], the system-wide criteria for Russia's transition to a new energy order are:

- transition to a flexible market architecture, by increasing the number of manufacturers, developing distributed generation, etc.;
- digitalization of energy facilities;
- introduction of new business models for managing energy companies;

– transformation of the principles of market regulation (shifting the emphasis from supporting producers to supporting active consumers).

The significance of the processes of diversifying energy sources, developing distributed generation and increasing the efficiency of processing energy resources for the development of sustainable energy has been considered earlier. An active consumer of electricity is a consumer who independently makes decisions about the mode of his electricity consumption and has the opportunity to sell the excess electricity he generates. As shown above, the level of adaptability of the power system, in addition to the amount of costs for its adaptation to external and internal changes, is determined by the number of possible, accessible and effective options for the system's response to these changes: the more there are, the more adaptive the system, all other things being equal. The emergence of an active consumer as an equal participant in the electricity market contributes to an increase in the level of adaptability of the energy system, since, by increasing the number of possible options for the system's response to ongoing changes, it makes it possible to smooth out peak loads, reduce the system reserve, optimize the operating modes of power plants and the electric power network, and reduce costs and losses. In addition, in the context of the implementation of strategic threats to energy security, leading to an increase in energy prices, active consumers have the opportunity to quickly increase their own generating capacity of electricity, which reduces their costs for energy resources and reduces the negative effect of the initial event. The emergence of an active consumer has a significant impact on the formation of the market structure, the pricing process, etc. Ultimately, active consumers, as new actors in the energy market, bring new opportunities for solving problems of ensuring energy security.

The development of sustainable energy is inextricably linked with the introduction of new information technologies into energy systems. One of the main trends in the development of information technologies, which are reflected in sustainable energy, are intelligent control systems and the Internet of things. As noted by S. N. Vasiliev, the term "intelligent control system" includes a combination of hardware and software, united by a common information process, contributing to the

achievement of the goal of control and optimization of controlled processes [348]. Intelligent control systems have long been used in energy systems, but in the last decade, due to the development of new technologies for collecting, transmitting and processing information, as well as the emergence of new control tasks related to improving the reliability, safety and environmental friendliness of energy systems, intelligent systems in the energy industry are experiencing a new wave of development. . One of the examples of the most successful modern projects for the introduction of intelligent control systems in energy systems is "smart grids" (Smart Grids), which, on the one hand, increase the reliability of the operation of electric power networks, and on the other hand, provide consumers with new energy management tools.

The Internet of Things allows not only to connect a large number of dissimilar equipment into one system with an intelligent control center, but also to create "digital twins" of drilling rigs, oil refineries, pipelines, electrical networks, which makes it possible to quickly identify failures and disturbances in the operation of the entire system, instantly find the source of these failures and eliminate them. The possibilities and prospects for the use of the Internet of things in the energy sector are currently widely discussed and considered in the works of such authors as H. Golpira [247], N. H. Motlagh [310] and others.

Information technologies can have two fundamentally different effects on the energy system, increasing its adaptive properties (Fig. 5.7). Firstly, information technologies increase the economic and technological efficiency of existing methods of extraction, transportation, processing and consumption of energy resources, while not fundamentally changing the structure and organization of energy systems management and creating effects that are easy to quantify. Secondly, information technologies, integrating into the existing energy system with an established structure, can lead to its qualitative transformations by changing the properties of individual elements.

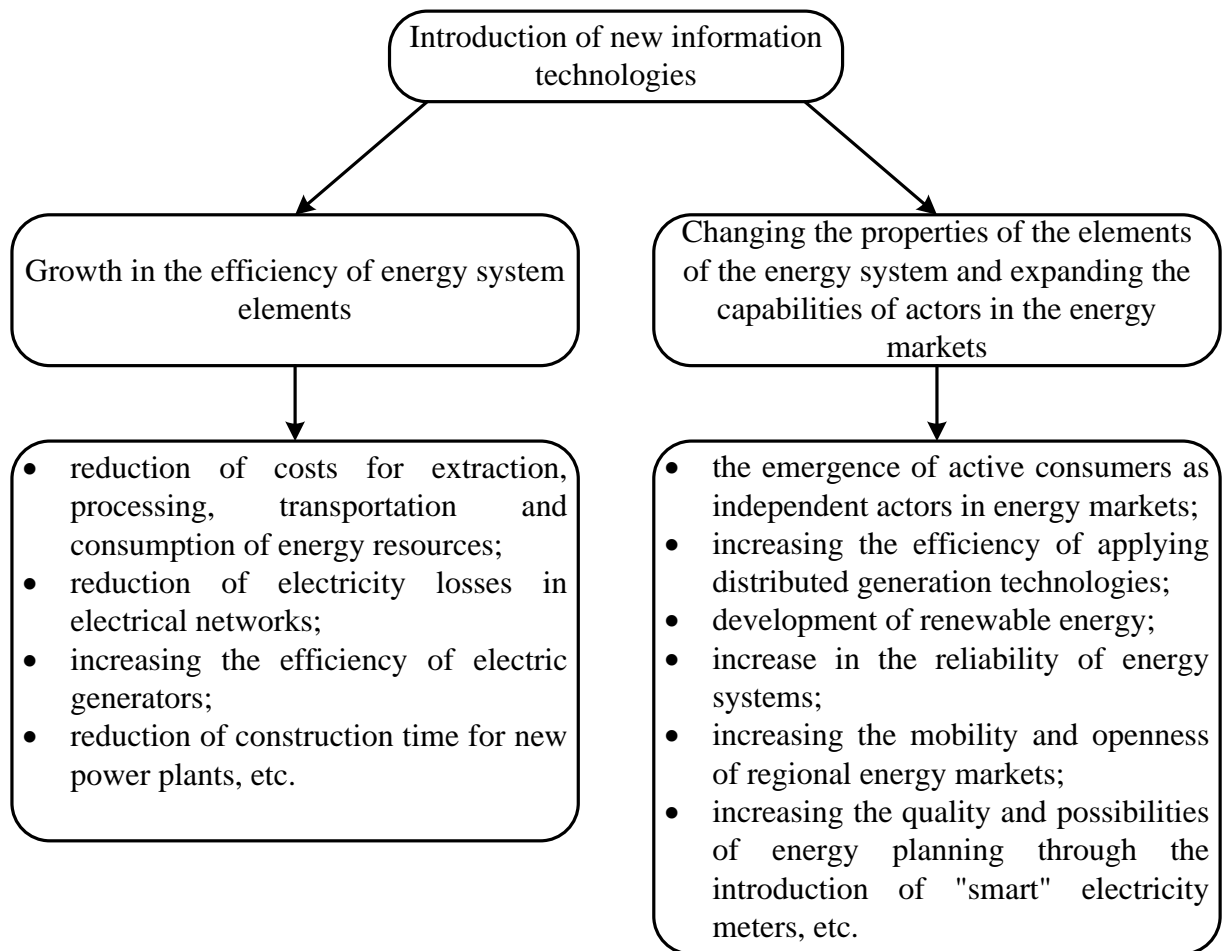


Figure 5.7 – Effects from the introduction of new information technologies in the energy system.

Source: compiled by the author

Transformed elements can create dynamic waves of changes in the structure and organization of the management process, leading to the expansion of the capabilities of individual actors and a change in their status in the energy system. The most striking example of the increase in the opportunities of individual actors is the emergence of technologies that provide energy consumers with the ability to sell surplus electricity.

The development of the principles of sustainable energy within the framework of the concept of sustainable development has led to the emergence of a fairly large number of studies in the field of analysis of the relationship between the quality of life of the population and the development of energy. The conducted studies show that a long-term increase in the quality of life of the population can be ensured only

on the basis of the formation of sustainable energy. Reducing the energy intensity of production, reducing greenhouse gas emissions, the development of distributed generation based on the use of renewable energy sources, as a result of the development of sustainable energy, improve the quality of life of the population by improving the environmental situation, increasing the safety of production and energy consumption, as well as by creating conditions for equal access to energy sources for all members of society (combating energy poverty).

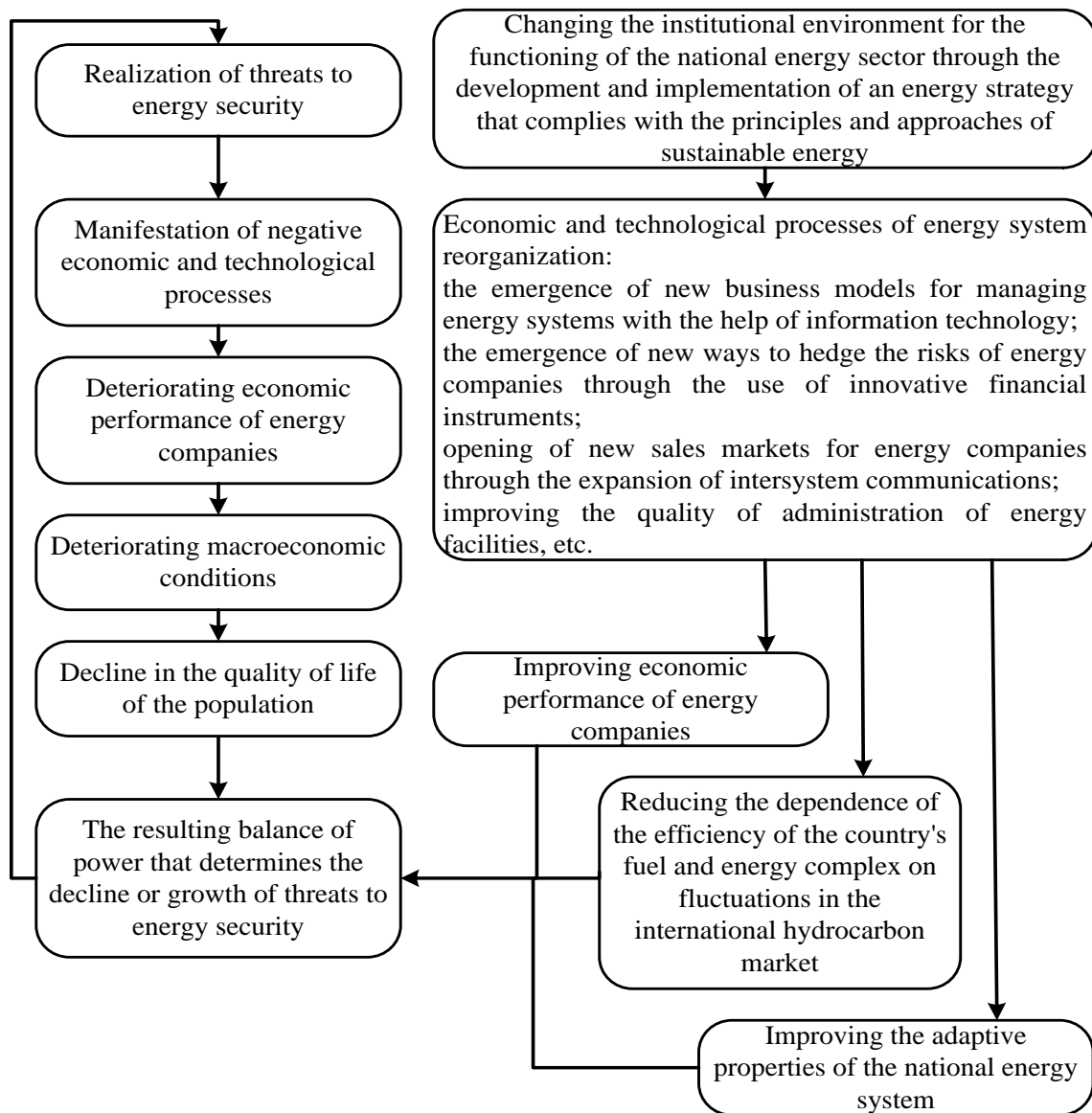


Figure 5.8 – Reducing the impact of the implementation of energy security threats on the quality of life of the population through the development of sustainable energy

Source: compiled by the author

The development of new organizational structures in the energy sector, the introduction of new information technologies, the diversification of the energy balance, etc., make it possible to create mechanisms that will transform the self-amplifying process of the emergence and implementation of strategic threats to energy security, leading to a decrease in the quality of life of the population (Fig. 5.8).

It should be noted that the development of sustainable energy does not mean abandoning the development of traditional energy based on the extraction, processing and consumption of hydrocarbons [294]. Elements of sustainable energy can act as additional elements of the national economy, reducing the risks and consequences of the implementation of strategic threats to energy security. Thus, it can be argued that the sustainable socio-economic development of the country, which involves the use of mechanisms for the development of a sustainable economy and sustainable energy, improves the quality of life of the population, and also contributes to solving the problems of ensuring energy security.

### **5.3. Institutional tools to sustainable energy transition in Russia**

The special role of energy in modern society, due to the breadth of coverage of social, economic and technological problems solved within the framework of the macroproblem of providing the economy of a country or region with energy resources, has led to the need to develop sustainable energy - resource-saving and environmentally friendly energy, based on the principles of sustainable development and providing high the quality of life of the population. The objective need for the establishment of sustainable energy in Russia is determined by the task of ensuring sustainable long-term economic growth, accompanied by an increase in the quality of life of the population, as well as the need to improve the environmental situation and develop an innovative economy. At the same time, the current structure of federal budget revenues stimulates the development of traditional energy, based on increasing production, domestic consumption and export of hydrocarbons. It is obvious that the development of traditional energy technologies, the use of

predominantly non-renewable energy sources and an increase in oil and gas exports in the medium term can maintain the current level of well-being. However, sustainable long-term growth of the economy and the level of the quality of life of the population can be achieved only if the Russian energy sector is innovatively developed, aimed at establishing a sustainable energy sector focused on balancing the interests of the economy, ecology and future generations.

At present, Russia is at the very beginning of the path of sustainable energy development, as evidenced by the dynamics of such basic parameters that determine the development of sustainable energy, as the share of renewable energy sources in the consumption structure of primary energy resources (Fig. 5.9) and the amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) produced.

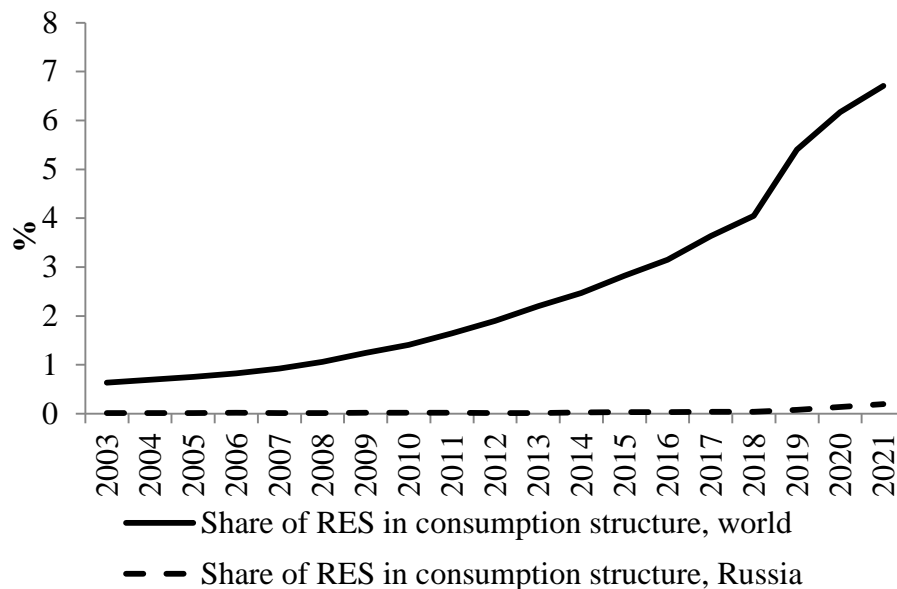


Figure 5.9 – Change in the share of renewable energy sources in the structure of primary energy resources

Source: Compiled by the author based on BP data

Figures 5.9 and 5.10 show that the share of renewable energy sources in the structure of primary energy resources in the world from 2003 to 2021 increased from 0.6% to 6.5%, while in Russia the value of this indicator increased from 0.01% up to 0.19%.



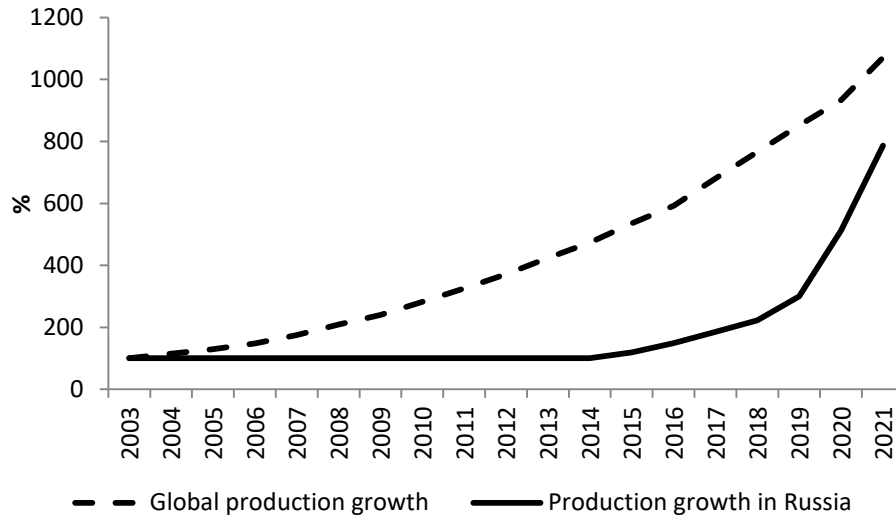


Figure 5.10 – Dynamics of energy generation from renewable sources (excluding hydropower)

Source: Compiled by the author based on BP data

The current political and economic situation in Russia hinders real technological progress in the national energy sector. Factors such as high capital intensity, long construction times for energy facilities, and the political clout of major national oil and gas companies are responsible for significant inertia in the Russian energy industry. As a result, it continues to develop along the path determined in the past: the growth of oil and natural gas production; expansion of networks of gas and oil pipelines and construction of large power plants; further monopolization of the industry. Thus, despite the relevance of the upcoming transition to a new energy order, there are many barriers to the development of sustainable energy in Russia, the main of which are technological and business barriers.

One of the main technological obstacles to the development of renewable energy in Russia is the low efficiency of the use of renewable energy sources at power plants running on fossil fuels. In 2017, the installed capacity utilization factor of solar and wind power plants in the Unified Energy System of Russia amounted to 14.67% and 14.82%, respectively. However, according to the Ministry of Energy of the Russian Federation, renewable energy sources have great potential for development in remote

energy regions of Russia. In addition, renewable energy sources can be used as a means to improve the reliability of energy supply.

Another technological obstacle to the development of renewable energy in Russia is the lack of necessary technologies. Russia has the scientific and technical potential for the development of new energy technologies, but at present the country is not among the world leaders in the field of energy. To solve this problem, the Ministry of Energy of the Russian Federation helps national energy companies to participate in international energy projects, design their own new equipment and gain access to foreign technologies through the implementation of government policies that can be described as “support for renewable energy sources in exchange for localization”. The term "localization" means that the government supports foreign investment in the domestic production of equipment for renewable energy sources, provided that most of the equipment will be produced in Russia. In wind energy, the demand for Russian components is set at 65%. The government expects that such an enabling environment policy will encourage international energy companies to enter the Russian market not only as suppliers, but also as producers.

The localization of production not only solves the technological problem of Russian energy companies, but also brings a new corporate culture and quality standards to the country, which, in turn, encourages Russian manufacturers to increase their own competitiveness. The lack of domestic investment makes the localization policy an extremely important tool for the economic and industrial development of Russian regions by increasing the efficiency of international business relations. Foreign investors can benefit from the localization of production in Russia, since, in addition to receiving tax benefits, they can participate in government tenders on the same terms as domestic companies.

The localization policy has already yielded some results. Russia has found the following technological partners in the development of wind and solar generation: Fortum Corporation (Finland), Vestas Wind Systems (Denmark) and Lagerwey (Netherlands). For example, Fortum Corporation produces electricity and heat at eight thermal power plants located in the Chelyabinsk and Tyumen regions. In 2018,

three solar and one wind power plants began operating in the Russian division of Fortum Corporation.

Despite all the benefits of sustainable energy, it is very difficult for the Russian government and energy companies to turn to green energy and lose huge profits. This is all the more true given the fact that renewable energy is quite expensive, especially against the background of the relatively cheap generation of electricity from fossil fuels. In addition, green energy in Russia is now financed mainly by consumers who are extremely unhappy with rising electricity prices. That is why the so-called business barriers are much more serious problems for the transition to sustainable energy in Russia. In general, business barriers to the innovative development of energy systems mean objective factors of a social, economic and political nature that impede the creation, implementation and wide dissemination of technologies and business methods that correspond to the new paradigm of sustainable energy development. Despite the significance of technological obstacles, business barriers remain a serious problem for sustainable energy development in Russia. There are four main business barriers to the development of sustainable energy in Russia [289]: underdeveloped innovation infrastructure; high uncertainty about the future state policy in the field of renewable energy development; ineffective government financial support for renewable energy producers; no environmental taxes in Russia.

Underdeveloped innovation infrastructure. Russian energy companies are faced with the problem of effective use of innovations to solve the following problems: development and implementation of new technologies to improve the performance of renewable energy sources; construction of new environmentally friendly fossil fuel power plants; improving the efficiency and reliability of electrical networks through the introduction of smart grid technologies. The problem partly arises from the underdevelopment of the innovative infrastructure of the energy industry, which leads to the existence of inefficient information support systems for the innovative activities of energy companies. This complicates the interaction between the participants in the innovation process. Accordingly, company leaders do not have the

opportunity to take into account the results of new research obtained at the level of individual research groups.

Russian energy companies, built on the principle of a rigid organizational structure, face all the shortcomings of the centralized management model: excessive bureaucracy and paperwork; business inflexibility; lack of effective communication between company departments; inefficient use of all types of resources; lack of consumer orientation. These shortcomings reduce management efficiency and make the entire company uncompetitive in a dynamic and volatile market, hindering the process of innovation.

The situation is complicated by the fact that, due to the great uncertainty about the future development of the Russian economy, Russian energy companies prefer to invest in the development of a network of oil and gas pipelines and innovations in the production of fossil fuels (in 2016, the total investment of Russian energy companies in innovations in the field of fossil fuel production amounted to US\$2.1 billion) rather than invest in green energy innovation. In addition, companies do not invest enough in the development of innovation infrastructure that yields results in the long term.

High uncertainty about the future state policy in the field of renewable energy development. Despite the existence of the State Program of the Russian Federation “Energy Efficiency and Energy Development”, which presents a plan to increase renewable energy capacity, the prevailing opinion in Russian society is that renewable energy is expensive, economically inefficient, and not worth it. to develop in a country with such huge reserves of fossil fuels, which will be enough for the coming decades, like Russia. This opinion, which influences the state energy policy, leads to the absence of an effective long-term state strategy for the development of renewable energy sources.

The instability and unpredictability of legislative changes is critical for companies that invest in renewable energy. Given the current economic situation in Russia and the international sanctions imposed on the Russian energy industry, there is a significant risk that in order to reduce budget spending related to state support for

green energy producers, the government will refuse to fulfill its obligations to support ongoing projects in the field of renewable energy development. Thus, investors must make decisions in an atmosphere of uncertainty, when the very existence of state support for renewable energy in Russia is doubtful.

Ineffective government financial support for renewable energy producers. Until 2011, small producers (including clean energy producers) had the option to sell their own electricity to consumers under the supervision of a supplier of last resort. A supplier of last resort is an energy company that is obligated to enter into an electricity supply agreement with any requesting end user in its particular region. Suppliers of last resort were also required to purchase electricity from retailers at government-approved rates. Thus, green energy producers had guaranteed sales.

As a result of the liberalization of the Russian power industry, which began in 2011, wholesale and retail markets for electricity and capacity were created, pricing in the wholesale electricity market became unregulated, and the obligation of large energy companies to buy electricity from retail producers was canceled. However, in 2013, last resort suppliers were again required to purchase surplus electricity from small producers at prices equal to the weighted average electricity (capacity) purchase prices on the wholesale market.

Since 2013, the main instrument of state support for renewable energy sources in Russia has been a feed-in tariff. The government offers long-term contracts to renewable energy producers with prices related to the cost of producing each technology. The contract is concluded on the basis of competitions, according to which projects are selected according to the criterion of the lowest capital costs. To participate in the competition, companies must meet the following two requirements: the guarantee requirement and the localization requirement.

In order to participate in the project selection competition, the company must provide a guarantee that the renewable energy facility will be built. If the object is not built, the guarantor will pay a fine (5% of the capital costs of the project). The localization policy described above, which is used to attract investment in the production of equipment for power plants using renewable energy sources, also

applies to companies engaged in the production of electricity from renewable sources. The government has set requirements for the minimum level of localization of equipment for wind farms, solar stations and small hydropower plants (Table 5.3.).

Table 5.3 – Requirements for the minimum level of equipment localization for different types of power plants

Power plant type	Year	Minimum level of equipment localization, %
Wind farms	2019-2024	65
Solar power plants	2016-2024	70
Small hydro power plants	2018-2024	65

Source: Decree of the Government of the Russian Federation dated May 28, 2013 No. 449

Since the localization policy has been applied relatively recently, the amount of power equipment produced in Russia is not enough for all market participants to achieve the minimum requirements for local content. Thus, government requirements for guarantees and localization of equipment for power plants create problems for investors in obtaining financial support.

No environmental taxes in Russia. Despite the fact that I. A. Bashmakov [14] and other specialists back in the 1990s noted that environmental taxes are the most important instrument of the state's environmental policy, there are still no environmental taxes in Russia.

Currently, Russian legislation provides for the following payments related to environmental pollution: environmental fee (paid by companies for the processing and disposal of goods and packaging); payment for negative environmental impact (paid by companies for emissions of pollutants into the atmosphere from stationary sources, emissions of pollutants into water and waste disposal).

These payments are administered by the Federal Service for Supervision of Natural Resources. The paid payments that come from the payers of the environmental fee are directed to the implementation of state programs in the form of subsidies to the constituent entities of the Russian Federation for co-financing of environmental programs. However, an analysis of the dynamics of receipts of payments for negative environmental impacts in the budget system of the Russian

Federation indicates a low efficiency in the collection of this non-tax payment, due in part to insufficient liability provided for its non-payment [113].

Since green energy producers are currently forced to compete with other energy producers under almost the same tax conditions, to change this situation, the Ministry of Finance of the Russian Federation has proposed introducing an environmental tax for companies and individual entrepreneurs that are liable for irreparable damage to the environment. According to the proposal fixed in the Strategy for the long-term development of the Russian Federation until 2050 with a low level of greenhouse gas emissions (the document was developed in accordance with Government Decree No. 2344-r of November 3, 2016), fixed tax rates will be applied to emissions of various water, as well as industrial waste disposal. Tax payers will have the opportunity to reduce its amount by taking measures that can actually reduce the negative impact on nature. The Ministry of Finance believes that the adoption of the amendments will allow, without changing the level of the tax burden, to increase budget revenues by improving the quality of administration. And this, in turn, will have a beneficial effect on the environmental development of the Russian Federation. The new tax will help increase the efficiency of pollution charges, but there is concern that the transfer of non-tax payments for negative environmental impacts to tax payments without clear mechanisms for distributing tax revenues for green energy support programs will lead to improper use of collected taxes.

However, the introduction of an environmental tax in Russia is a necessary but not sufficient incentive for Russian energy companies to reduce emissions through the development of green technologies. The next step in reforming Russian taxation in the direction of its greening could be the introduction of a carbon tax, the ultimate goal of which is to limit climate change caused by greenhouse gas emissions.

According to the developers of the Paris climate agreement, at the beginning of the XXI century, human-related greenhouse gas emissions have reached historic highs. However, despite the continued absolute growth of greenhouse gas emissions in the world (for example, from 2005 to 2015, the volume of CO<sub>2</sub> emissions in the world increased from 28,533 million tons to 33,508 million tons), over the past 10

years, the process of reducing specific emissions CO<sub>2</sub> per 1 toe consumed by the economy (Fig. 5. 11). The exception is Japan, where in 2011 there was a sharp jump in specific CO<sub>2</sub> emissions, because as a result of the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant, the Japanese government decided to abruptly phase out nuclear power, reducing electricity supplies from nuclear power plants from 31.2% in February 2011 to 0% in May 2012, and increasing the share of hydrocarbons in the country's energy balance.

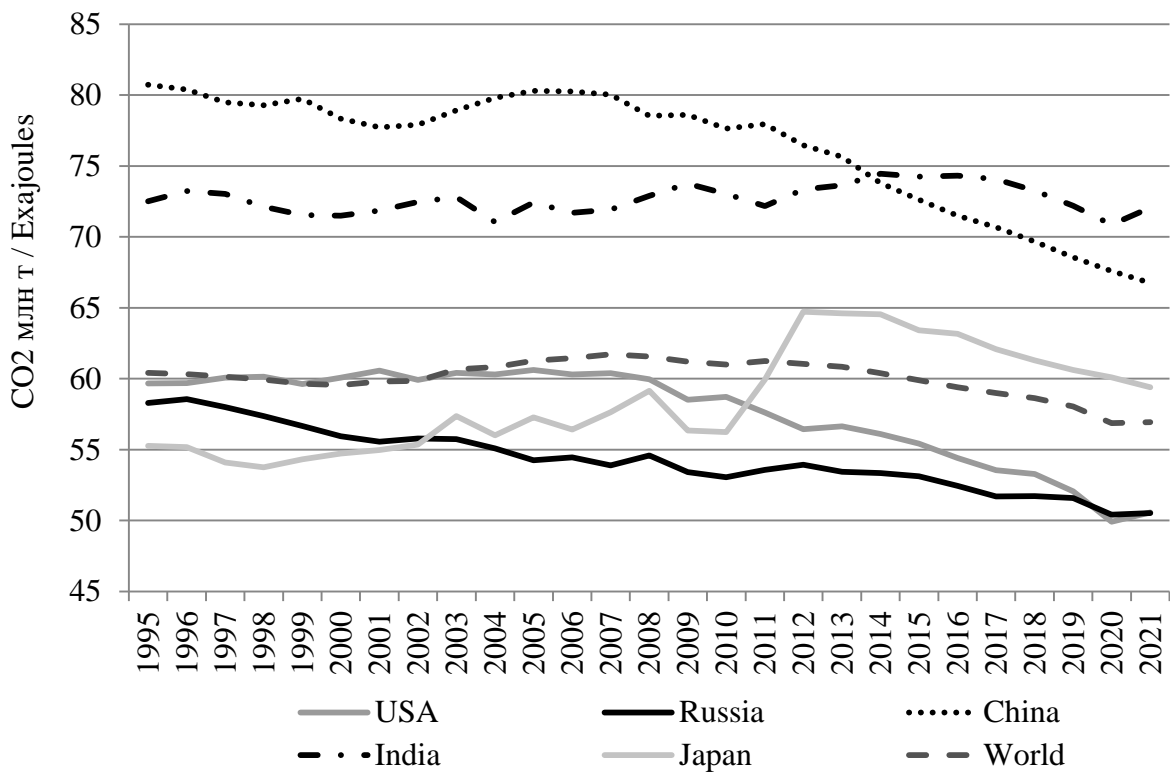


Figure 5.11 – Specific CO<sub>2</sub> emissions, t/toe

Source: calculated by the author using BP data

Russia joined the Paris Agreement and should reduce hydrocarbon emissions by 25% compared to the 1990 level. A study by I. A. Bashmakov and A. D. Myshak [12] showed that this is quite realistic. However, in practice, the achievement of this goal is hindered by some common misconceptions on the part of experts, officials and business representatives, indicating that the problem of reducing greenhouse gas emissions and continuing global cooperation on this issue is perceived in Russian society to a greater extent in the context of the country's image, and not real threat.



It is believed that the implementation of measures to reduce greenhouse gas emissions will lead to an increase in the risks of economic development of the country's regions, a significant share of the energy balance of which falls on coal, as well as to a deterioration in the investment attractiveness of those regions where energy-intensive industries are located. At the same time, environmentalists agree that the problem of reducing hydrocarbon emissions, instead of a threat to the Russian economy, can be seen as the possibility of structural changes in the energy sector and direct efforts towards the development of energy alternatives that will ensure economic and social development in these regions.

Another common misconception is that the introduction of a carbon tax or a carbon cap mechanism will cause a country's economic development to slow down due to the additional financial burden due to higher electricity and heat prices. As a refutation, I. A. Bashmakov et al. cite as an example the economic situation in most European countries that apply a carbon tax [13, 15]. In addition, in the medium term, an increase in electricity prices for end-users, other things being equal, stimulates the development and application of energy-saving technologies, which will also contribute to the achievement of sustainable energy development goals.

Thus, the small changes in CO<sub>2</sub> emissions observed in Russia over the past 20 years are explained mainly by structural changes in the economy and the dynamics of the country's real GDP (Fig. 5.12), and not by qualitative changes in the functioning of the national energy system. The main goal set by the Paris Agreement is to continue reducing greenhouse gas emissions and limit temperature rise to two degrees. Since climate change has a significant impact on economic development, the solution of this problem is an integral part of achieving sustainable economic development. One effective solution to this problem is the introduction of a carbon tax.

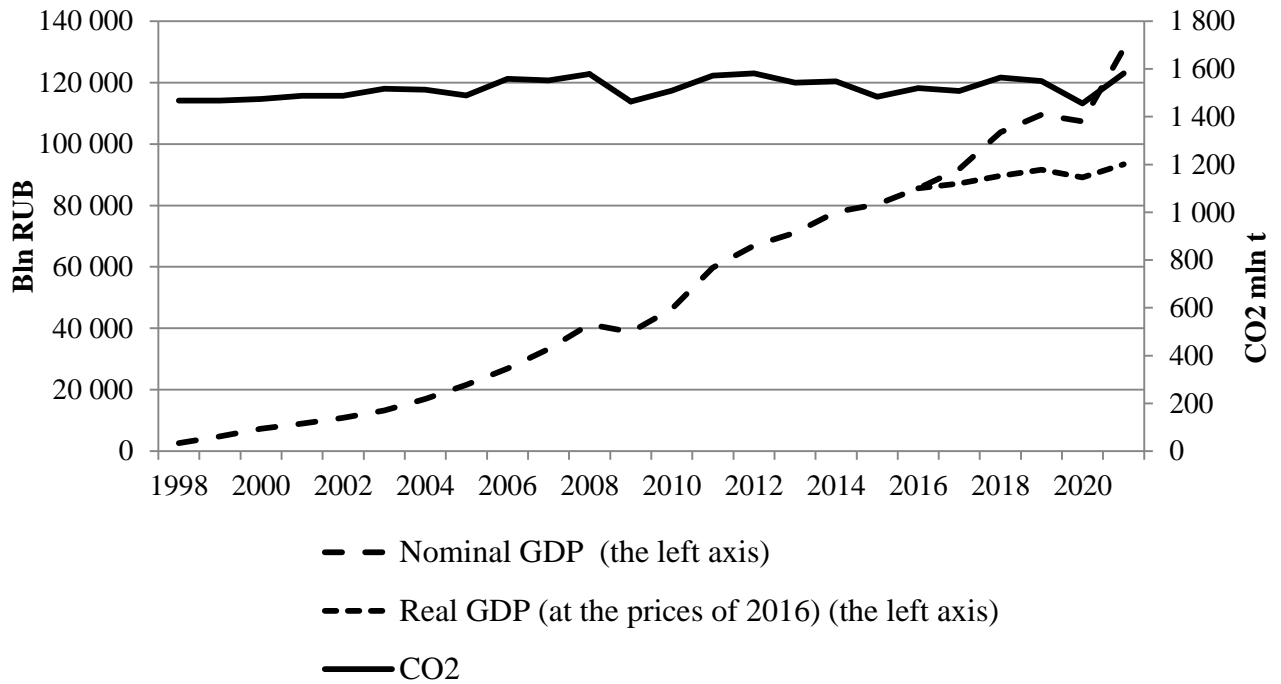


Figure 5.12 – Dynamics of CO2 emissions and Russia's GDP

Source: calculated by the author using BP data

According to studies by the Organization for Economic Cooperation and Development, in most countries the totality of existing environmental taxes (fuel excises, taxes on pollutant emissions, etc.) is supplemented by a carbon tax for energy producers [233]. In Europe, the carbon tax began to be introduced in the Scandinavian countries in addition to energy taxes in 1990-1991. Initially, its rate was approximately 11-13% of the energy tax. The tax rate was reduced by 25% for companies that signed long-term energy saving agreements with the government. 40% of the funds raised from the carbon tax were used to subsidize the introduction of green technologies, and 60% of the tax was returned to the industry. Since the introduction of the carbon tax to the present in Europe, CO2 emissions from the energy sector have fallen by more than a third, and GDP has grown by almost half. Currently, the average effective carbon tax rate for all sectors of the economy in 41 countries considered in the OECD study is 14.4 euros/tCO<sub>2</sub>, but the current level of tax collection does not correspond to the real costs of eliminating losses from climate change [233].

Since energy production and consumption will continuously increase in the coming years, it is necessary to accelerate the transition to sustainable energy through more efficient energy technologies and the development of renewable energy sources. The current situation in the Russian energy sector can be described as follows: an environmentally and economically inefficient system with no internal incentives for self-improvement continues to follow a long-standing trajectory of extensive development. An attempt to initiate the process of transition to sustainable energy in Russia was made 7 years ago, when the Russian power industry was being liberalized. One of the goals of the reform was to increase the efficiency of the Russian energy sector and create favorable conditions for the introduction of technologies for the use of renewable energy sources. However, the main barriers to the development of the Russian energy sector have not yet been overcome. That is why only an active state energy policy aimed at overcoming technological and business barriers can contribute to the transformation of the national energy system in accordance with the principles of sustainable development.

In the context of the perceived need to develop sustainable energy, the task of changing the trajectory of the development of the national economy, taking into account the existence of strong economic incentives for the use of traditional energy sources, becomes relevant. Since the trajectory of development of economic systems is determined not only by the current structure of relative prices and investment incentives [65], but also by the existing system of socio-economic institutions, in order to establish sustainable energy in Russia, it is necessary to create a favorable institutional environment that takes into account the complication of the relationship between the economy and energy, the growth of uncertainty, as well as shifting the emphasis in planning economic and energy development to indicators of the quality of life of the population.

In Russia, an institutional environment has historically been formed that stimulates the efficient functioning and development of large energy monopoly companies with a high inertia in their development, which determines the stability of the trend of progressive development of traditional energy. Such an institutional

environment has developed as a result of the action of many factors, but the following circumstances had the greatest influence on this process [290]:

1. Features of the economic system of the Soviet Union. The economic system of the Soviet Union led to the creation of large industrial and energy enterprises that were difficult to adapt to the creation of mobile competitive markets. The institutional and production environment inherited by Russia from the Soviet Union still has a significant impact on the current development of the Russian economy and energy, which corresponds to the ideas of D. North, according to which formal and especially informal institutions, having high inertia, are transformed extremely slowly .

2. The rapid liberalization of the economy in the 1990s, which was later replaced by its consistent nationalization. Since the 2000s the state began to intervene more and more in economic processes. By bureaucratizing the management procedures of large energy companies, government agencies have reduced their ability to adapt to the processes taking place in the global economy and energy.

Energy systems are inherently inertial, but the peculiarities of the institutional environment can strengthen or weaken the inertia, accelerating or slowing down the pace of their evolutionary changes. We can distinguish the following main features of the institutional environment that form a high inertia in the development of Russian energy companies [289]:

1. Low competition in the energy market, manifested in the predominance of large energy companies that are able to lobby their interests in the development and implementation of the state energy policy.

2. High legal barriers that make it difficult for potential green energy producers to enter the market.

3. Politicization of the international trade activities of large energy companies, leading to government incentives to increase production and export of oil and gas.

4. Financial and organizational support for the activities of large energy companies.

5. Weak dissemination and acceptance in the Russian society of the ideas of combating environmental pollution and climate change.

Creating an institutional environment conducive to the development of sustainable energy in Russia and ensuring long-term growth in the living standards of the population is a difficult but achievable task. Since existing informal institutions are transformed under the influence of changing conditions for the functioning of economic entities, the government can initiate the transformation of the institutional environment by changing formal institutions. Within the framework of a targeted state energy policy, it is possible to create a closed self-reinforcing transformational process in which changes in the institutional environment (namely, formal institutions) will lead to systemic changes in the energy sector (creation of adaptive distributed generation, development of renewable energy sources, creation of infrastructure for the development and implementation of new energy-saving technologies), which, in turn, will stimulate changes in informal institutions (Fig. 5.13). In this case, we are not talking about changing the institutional matrix from the X-matrix to the Y-matrix [65], but about the creation of such new formal and informal institutions that will stimulate the development of energy systems in a priority direction due to the formation of desirable transformational motives.

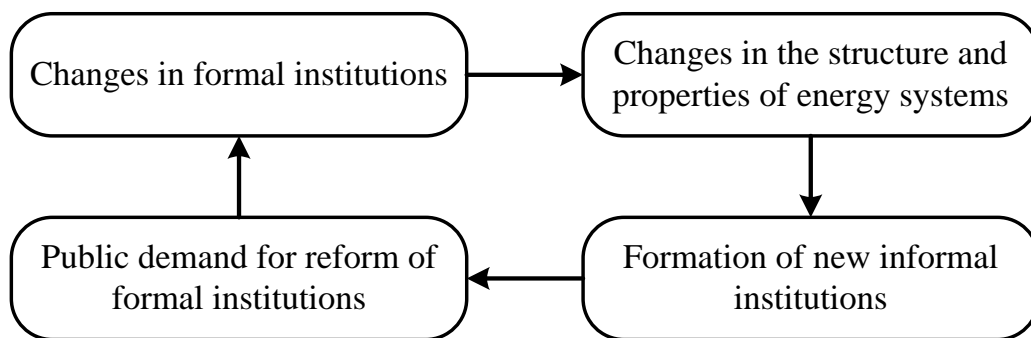


Figure 5.13 – Self-reinforcing process of changing the institutional environment for the functioning of domestic energy companies

Source: compiled by the author

One of the most effective tools for creating the necessary transformational incentives is to reform the national tax system. Taxes have a significant impact on economic development, having an indirect impact on the decisions made by the subjects of the economy. As shown above, tax reform can make taxes a powerful tool

to stimulate the adoption of new energy-saving technologies, reduce carbon dioxide emissions and increase the share of renewable energy in the energy mix.

At present, embodying qualitative changes in the paradigm of socio-economic development in accordance with the basic principles of the concept of sustainable development, environmental taxes are actively used abroad and occupy a special place in the system of taxes and fees of any economically developed state. Considering the experience of foreign countries, it can be noted that the successful introduction of environmental taxes is largely due to the complexity of the approach to reforming the current taxation in accordance with the principles of the concept of sustainable development. According to a number of experts [13], the reform of Russian taxation in the direction of its greening should provide for the following:

1. A unified concept of environmental taxation should be developed, including clearly formulated goals and objectives, the solution of which should be aimed at achieving sustainable economic development based on environmentally friendly and resource-saving technologies.

2. The existing taxes on the use of natural resources should be transferred to the category of environmental taxes.

3. The introduction of a carbon tax should be carried out in accordance with the principle of fiscal neutrality, that is, accompanied by a reduction in rates for a number of existing taxes.

4. The carbon tax rate should correspond to the economic damage caused by each additional unit of CO<sub>2</sub> emissions.

5. It is necessary to improve the mechanisms for monitoring the environmental damage caused.

Reforming the Russian tax system through the introduction of environmental taxes will make it possible to correct production methods that are undesirable for society and reduce the use of technologies in the energy sector that are harmful to the environment, helping the Russian energy sector to enter the path of sustainable development.

Another tool that contributes to the formation of a sustainable economy and energy, as well as solving the problem of ensuring long-term growth in the quality of life of the population, is the financial market [99]. The sustainable development goals have a direct impact on the creation of modern investment tactics, the improvement of financial and investment products and tools.

The trend of introducing the ESG approach (Environment, Social and Governance) into the practice of making managerial decisions is, of course, one of the tools for the transition to sustainable energy. According to this approach to investment, a company or an individual investor introduces the criteria of socially responsible behavior into the practice of evaluating investment projects and making investment decisions. Within the framework of the energy industry, socially responsible behavior is expressed, first of all, in the greening of companies' activities and increasing their social role.

However, it is necessary to note the limits of the practical use of this approach. The problem is that with the growth of the absolute and relative volumes of investments in sustainable projects that are effective from the point of view of responsible behavior, the contradiction between the commercial interest of investors, which is to maximize profits, and the interests of the company, which seeks to carry out its activities in accordance with the criteria of the concept, will grow. sustainable development (reducing emissions, increasing social protection, reducing inequality, etc.). This contradiction will inevitably lead to a slowdown in the growth of funding for sustainable projects and the emergence of a conflict situation in which the governments of a number of countries, as well as groups of interested persons, will put pressure on private investors in order to force them to invest in economically inefficient or inefficient projects. At present, the introduction of the ESG approach into the practice of assessing the effectiveness of investments in the energy sector from a commercial point of view can be justified by increasing the loyalty of consumers, investors and governments. With the achievement of a certain threshold value, this contradiction will lead to a slowdown in the transformation processes.

The compliance of companies' activities with the principles of sustainable development is already being assessed by the world's leading rating agencies, and the use of "green" financial instruments has become an effective way to stimulate investment in the development and implementation of energy saving technologies [204, 276].

Currently, responsible investment is attracting the attention of investors around the world [109]. According to studies, about 40% of investors in the world already use responsible investment tools [309]. At the same time, in Russia, interest in the use of green financial instruments is just beginning to emerge: the first "green" bonds in the history of the country were placed on the Moscow Exchange in December 2018. However, in order to improve the energy efficiency of the Russian economy and solve environmental problems, it is necessary to introduce various financial products, including credit and insurance. The need to form a national system of financial instruments for sustainable development is indicated in the "Guidelines for the Development of the Financial Market of the Russian Federation for the Period 2019-2021", and currently, under the auspices of the Bank of Russia, work is underway to develop national rules and standards for the verification of green financial instruments.

Another way to form a new informal institutional environment that facilitates the transition to a sustainable economy in general and sustainable energy in particular is the development of university educational programs, namely the introduction of responsible management education programs into the educational process. The basis of responsible management education is the principles of the concept of sustainable development. Being one of the centers of socio-economic development, the university is sensitive to changes in public demands by changing educational programs. The task of implementing the principles of responsible management education is to train specialists capable of making managerial decisions in the face of the need to reconcile the interests of individual companies and society as a whole with positive long-term effects for the global economy. Understanding the new business reality and the need for economic, social and environmental responsibility,



promoting the use of innovative projects and practices, studying the features of sustainable management and trends in the development of the digital society, will stimulate the emergence and implementation of new business models that contribute to sustainable socio-economic development and quality improvement life. It is the new university programs that will disseminate the principles and values of "responsible management", which are of great importance for creating an institutional environment conducive to the development of sustainable energy.

Changes in the institutional environment, among other things, will affect the selection and implementation of investment projects in the energy sector. Taking into account the proposed directions for changing the institutional environment, investment projects will be selected that are more consistent with the principles of sustainable development (Fig. 5.14).

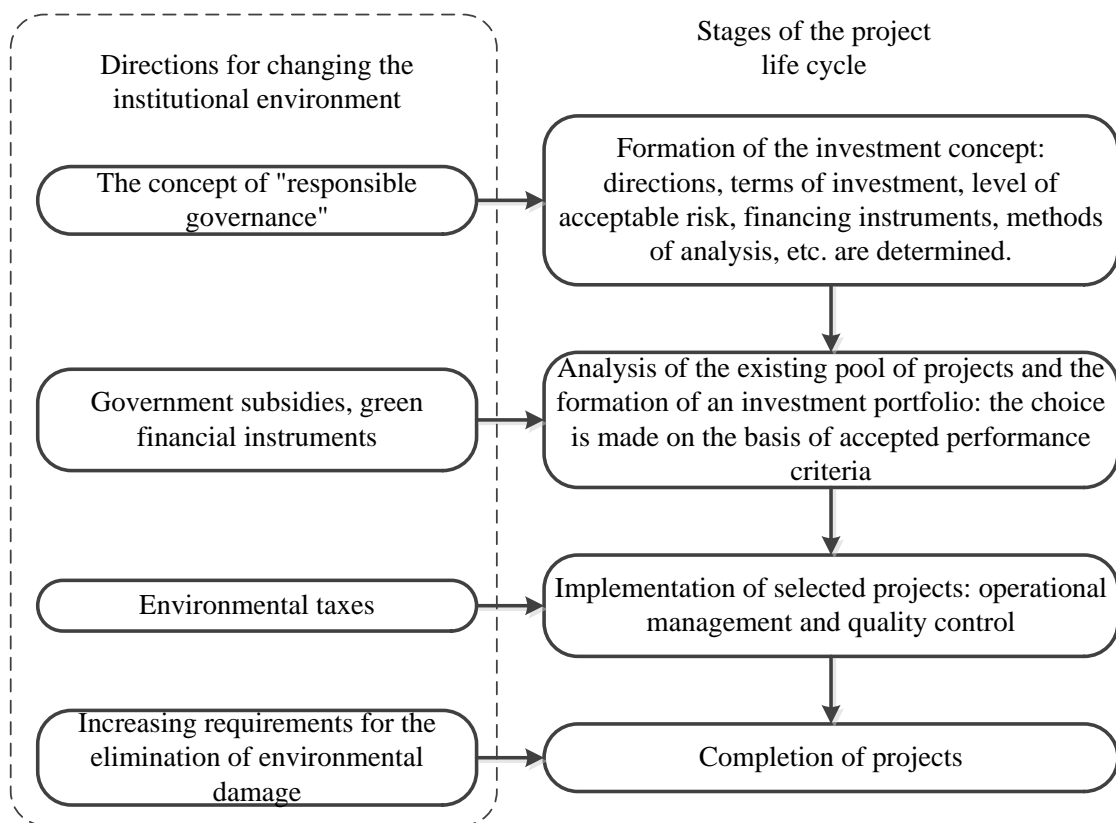


Figure 5.14 – The relationship between the directions of change in the institutional environment and the stages of the life cycle of an investment project

Source: compiled by the author

Changing the institutional environment in accordance with the principles of the concept of sustainable development will contribute to solving the problems of ensuring energy security by stimulating changes in the structure of energy systems, which will increase the adaptive properties of the national energy system and reduce the risks of reducing the quality of life of the population due to the implementation of threats to energy security (Fig. 5.15).

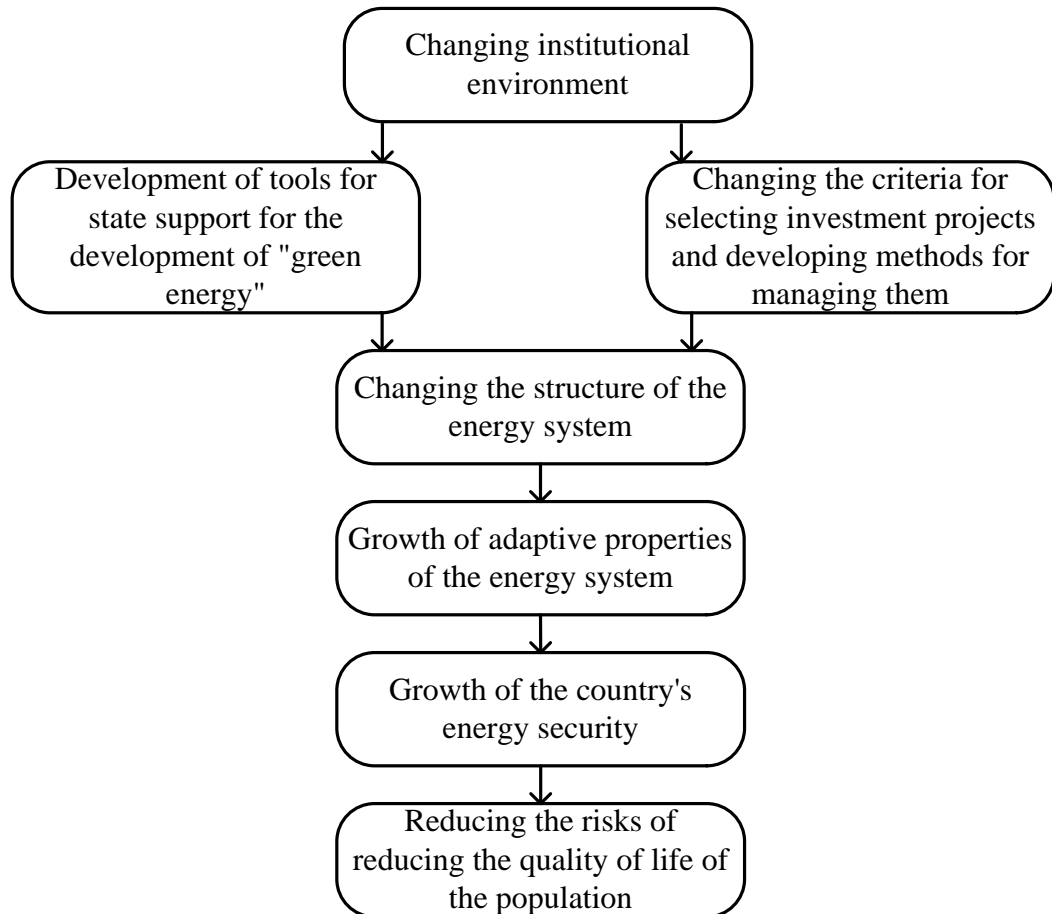


Figure 5.15 – Place of change in the institutional environment in the process of solving the problems of ensuring energy security

Source: compiled by the author

Currently, the Russian energy sector is at the crossroads of two roads: one road ensures stable medium-term economic growth through the further development of traditional energy, focused on the export of oil and gas, the other - lays the foundation for the long-term prosperity of Russian society through the development of a sustainable economy in general and sustainable energy in particular. The advantages

of sustainable energy lie in its focus on the growth of economic well-being and the psychological comfort of the population by solving environmental problems, developing safer ways of producing and transporting energy, and reducing the vulnerability of energy systems to the implementation of various kinds of stressful situations. Under the influence of a number of factors, stable socio-economic institutions have been formed in Russia to date, which slow down the process of transformation of the national energy sector. In this regard, individual initiatives aimed at the implementation of certain specific renewable energy development projects or the development and implementation of green technologies cannot become the basis of a long-term energy transition process. In order to radically change the current paradigm of the development of the Russian energy sector, serious work must be done to change the institutional environment for the functioning of Russian energy companies.

**Chapter conclusions.** It was shown that at present the discourse of the problem of ensuring the growth of the quality of life has been expanded with issues of the quality and security of energy resources supplies. An approach was proposed to interpret strategic threats to energy security as risks of a decrease in the quality of life. On the basis of the proposed approach, a method for quantitative assessment of the risks of reducing the quality of due to the implementation of threats to energy security has been developed. Using the proposed scheme for assessing the consequences of the risk of reducing the quality of life due to the implementation of strategic threats to energy security, as well as the results of assessing the macroeconomic consequences of the implementation of such a strategic threat to energy security as the lack of investment in the electric power industry, given in the fourth chapter of the dissertation research, the following results were obtained. The fall in household income in the long term (assuming the current population size and income distribution structure is maintained) will be up to 1.9% (with a 4% investment deficit).

The expansion of scientific knowledge about the role of energy resources and energy systems in the process of ensuring the growth of the quality of life in modern

conditions is especially important for Russia with its developed energy industry. The identification and analysis of the risks of reducing the quality of life as a result of the implementation of threats to energy security is helpful for development of strategies aimed at stabilization of the growth dynamics of the quality of life.

It was shown that reducing the impact of energy security threats on the quality of life of can be achieved through the development of sustainable energy. The necessity of accelerating the process of transition to sustainable energy in Russia by increasing the efficiency of energy technologies and developing renewable energy sources is substantiated. Despite the reform carried out to liberalize the Russian electric power industry, aimed, among other things, at increasing the efficiency of the Russian energy sector and creating favorable conditions for the introduction of technologies for the use of renewable energy sources, the main barriers to the development of sustainable energy in Russia have not yet been overcome.

In the context of the perceived need to develop sustainable energy, the task of changing the trajectory of the development of the national economy, taking into account the existence of strong economic incentives for the use of traditional energy sources, becomes relevant. It was concluded that, since the trajectory of the development of economic systems is determined not only by the current structure of relative prices and investment incentives, but also by the existing system of socio-economic institutions, in order to establish sustainable energy in Russia, it is necessary to create a favorable institutional environment.

Based on the analysis of the features of the historically established institutional environment that stimulates the effective functioning and development in Russia of large energy monopoly companies with a high inertia of their development, the main directions for changing the institutional environment that contribute to the transition to sustainable energy and ensure a high level of quality of life are proposed.

## CONCLUSION

The main theoretical and practical results of the research are in the field of energy systems management and aim at developing existing methods for making optimal decisions to improve the country's energy security. The following main results were obtained.

1. The stages of the energy security concept evolution are identified, and the main factors that determine it are analyzed.

The study of the energy security concept origin and its further transformation, as well as changes in the content of it is important for better understanding of the energy security issue. The changes in the semantic content of the concept were considered against the background of ongoing historical events. The complication of the relationship between the economy and energy, the increase in the uncertainty of the energy markets, the growth of political and economic risks, the development and rapid introduction of new technologies in the field of extraction and processing of energy resources determine the further development of the energy security concept and the emergence of new tools for ensuring energy security.

2. The conclusion is drawn that there is a difference in approaches to assessment and ensuring energy security between net importers and net exporters of energy resources.

The research shows that countries, which are net importers of energy resources, focus on the processes of transportation and consumption of energy resources. The problems of converting energy resources into electricity and heat, as well as their distribution within the country, are secondary in the discourse of energy security issues. The status of a net importer of energy resources shifts the focus of energy policy to the reliability of energy supplies, the diversification of the energy balance, the development of renewable energy sources, and the risks of possible interruptions in the supply of energy resources.

For Russia, which is a net exporter with one of the largest hydrocarbon reserves in the world and with the vast uneven populated territory, the most challenging stages in the process of production and consumption of energy are transformation and

transportation of energy resources. In this regard, the long-term energy security of Russia lies in the field of ensuring the long-term balanced development of the energy industry.

3. It is proved that risk analysis, adaptability theory, investment attractiveness of the economy, dynamics of quality of life change should be integrated into the algorithm for ensuring the long-term energy security. The environment of energy companies is characterized by an increase in uncertainty and risks due to growing geopolitical tensions, accelerating scientific and technological progress, ongoing integration of real and financial markets, new environmental requirements, etc.

The consequences of the negative impact of uncertainty and risks of energy security threats can be minimized using such a property of developing open systems as adaptability. Since adaptation measures may require the attraction of investment resources, the management of the adaptive properties of energy systems with the aim to ensure long-term energy security should be carried out together with the development of an investment climate which should be favorable for providing the energy industry with the resources necessary to finance adaptation measures.

Based on the analysis of current trends in the country's economy and energy industry development, it is concluded that it is necessary to include in the algorithm for ensuring long-term energy security the issues of reducing the impact of the implementation of energy security threats on the quality of life.

4. The list of factors that determine the level of energy system adaptability has been refined.

The fundamental changes taking place in the global energy sector have a significant impact on the factors that determine the energy system adaptability. Previously, the efficiency and adaptability of energy systems were based on the presence of large reserves of production capacities and energy resources. Currently, production and resource reserves, while remaining significant for ensuring the reliability of the energy system operation, have lost their priority in ensuring adaptability. Factors associated with sustainable energy are increasingly coming to the fore in increasing the flexibility and sustainability of energy systems:

diversification of the types of consumed energy resources; diversification of the structure of generating capacities by type of power plants; diversification of suppliers of energy resources; growth of energy efficiency of production and, as a result, a decrease in the energy intensity of the economy; development of renewable energy sources, etc.

5. The principles of adding new elements and interconnections to the national energy system for its adaptability improvement are formulated. Methods of direct and indirect control over the national energy system are identified and described from the point of view of adaptability improvement.

The national energy system is a complex dynamic system, the development of which is determined both by internal processes in the system itself and by exogenous factors of control by independent actors, leading to the emergence of new elements and relationships within the system. The emergence of new elements of the national energy system can lead to both an increase in the vulnerability of the system and an increase in its adaptive properties. The study makes it possible to formulate the key principles for adding new elements and interconnections to the national energy system which could be used for energy policy development by a government.

6. A method has been developed for assessing the level of adaptability and riskiness of alternative options for the long-term energy system development. The method could be used for state energy policy development as additional tool for alternatives option assessment.

7. The role of investments in the process of forming the adaptive properties of energy systems is revealed.

Investments are a necessary resource that ensures the progressive development and transformation of the national energy system, which leads to an increase in its adaptive properties. Based on the formulated principles of adding new elements and interconnections to the national energy system, the main directions of the positive impact of investments on the adaptive properties of energy systems were identified.

8. The mechanism of a long-term self-reinforcing process of deploying the strategic threat of a shortage of investments in the energy industry, accompanied by a

drop in the adaptive properties of energy systems, is revealed. The macroeconomic consequences of the investment deficit are analyzed.

In view of the important role of investments in ensuring long-term energy security and shaping the adaptive properties of energy systems, a study was made of the consequences of the investments shortage in the energy industry. The study revealed the existence of a long-term self-amplifying process of deploying a strategic threat of investments shortage. The reinforcement happens due to the following logic. The investment deficit leads to shortage of supplied energy resources which inevitably leads to a lag in the development of the energy industry from the needs of the economy. If the development of the energy industry lags behind the needs of the economy, the outstripping growth of the economy will lead to an increase in energy prices, a slowdown in economic development and a decrease in the level of the country's energy security. Prolonged underfunding of the electricity sector could cause large-scale electricity shortages and adverse effects in all sectors of the economy and the social sphere.

9. The study of the adaptability property of complex dynamic systems using marginal analysis tools made it possible to identify and describe the adaptability property of investment projects in the energy industry in the context of the impact of the implementation of individual large-scale investment projects on the adaptive properties of energy systems.

The method was proposed for taking into account marginal prices for energy resources. The method increases the validity of investment decisions made in the energy industry.

10. Mechanisms of the impact of threats to energy security on the quality of life have been identified. An indicator for assessing the risks of reducing the quality of life due to strategic threats realization is developed.

An approach is proposed to interpret strategic threats to energy security as risks of a decrease in the quality of life. On the basis of the proposed approach, a method for quantitative assessment of the risks of reducing the quality of life has been



developed. This result makes it possible to use not only macroeconomic indicators but also the quality of life as a criterion for effective energy strategy development.

11. The possibility of reducing the impact of energy security threats on the quality of life by the development of sustainable energy is proved.

The development of new organizational structures in the energy industry, the introduction of new information technologies, the diversification of the energy balance, etc., being fundamentals of sustainable energy, make it possible to create mechanisms that will stop the self-amplifying process of the emergence and realization of strategic threats, leading to a decrease in the quality of life. In the context of the perceived need to develop sustainable energy, the task of changing the trajectory of the national economy development becomes relevant. The study showed that one of the additional incentives for transit to sustainable energy is that this transition would increase energy security.

## REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation dated May 13, 2019 No. 216 "Doctrine of Energy Security of the Russian Federation".
2. Decree of the Government of the Russian Federation No. 335 dated March 28, 2019 State Program of the Russian Federation "Energy Development".
3. Decree of the Government of the Russian Federation "The main directions of state policy in the field of improving the energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources for the period up to 2035" (as amended on March 24, 2022).
4. Decree of the President of the Russian Federation of May 7, 2018 No. 204 "On national goals and strategic objectives for the development of the Russian Federation for the period up to 2024".
5. "Forecast of scientific and technical development of the branches of the fuel and energy complex of Russia for the period up to 2035": Approved by the Ministry of Energy of the Russian Federation on October 14, 2016.
6. Decree of the Government of the Russian Federation of June 9, 2020 No. 1523-r "Energy Strategy of Russia for the period up to 2035".
7. Aganbegyan A. G. Russian fuel and energy complex - the future, taking into account the requirements of sustainable development and the geopolitical situation // Scientific Works of the Free Economic Society of Russia. 2022. No. 4. pp. 359-383.
8. Asian part of Russia: modeling of economic development in the context of historical experience / ed. ed. V. A. Lamin, V. Yu. Malov. - Novosibirsk: Publishing house of SO RAN, 2012. 464 p.
9. Antonov G. N. Methods and models for studying the survivability of energy systems / G. N. Antonov, G. N. Cherkesov, L. D. Krivorutsky - Novosibirsk: Nauka. Siberian branch, 1990. 285 p.

10. Afanasiev A. A., Baranov N. N. World energy: global problems and development prospects // Energy: economics, technology, ecology. 2021. No. 2. pp. 28-47.
11. Baranov NN Non-traditional sources and methods of energy conversion. - M.: MPEI Publishing House, 2012. 384 p.
12. Bashmakov I. A., Myshak A. D. Costs and benefits of implementing low-carbon development strategies in Russia: prospects until 2050 // Issues of Economics. - 2014. - No. 8. - P. 70-91.
13. Bashmakov I. A. Carbon tax in the system of energy taxes and environmental taxes // Ecological Bulletin of Russia. 2018. №3. pp. 1-13.
14. Bashmakov I. A. The scale of the necessary efforts to decarbonize the world industry // Fundamental and applied climatology. 2022. No. 2. pp. 151-174.
15. Bashmakov I. A. Energy of the world: myths of the past and lessons of the future / I. A. Bashmakov // Questions of Economics. 2018. No. 4. pp. 49-75.
16. Belik I. S., Kamdina L. V. Influence of the energy factor on the quality of life of households // Bulletin of the Kemerovo State University. Series: Political, sociological and economic sciences. 2017. No. 4. S. 18-22.
17. Belyaev L. S. Problems of the electric power market - Novosibirsk: Nauka, 2009. 296 p.
18. Belyaev L. S., Voitsekhovskaya G. V., Efimov N. T., Savelyev V. A. Solving the problems of development of generating capacities of electric power systems taking into account the uncertainty of the initial information // Uncertainty factor in making optimal decisions in large energy systems. - Irkutsk: SEI SO RAN, 1974. 184 p.
19. Bessel V.V. On the prospects for the development of global energy and its impact on the energy security of Russia. Burenie i Neft. 2021. No. 5. pp. 44-53.
20. Bortalevich S. I. Ways to ensure sustainable energy development of regional economic systems in the framework of the energy security management of the region // Problems of the market economy. 2015. No. 1. pp. 41-46.

21. Bushuev V.V., V.V. Bushuev, N.I. Voropay, S.M. Senderov, V.V. Saenko On the Energy Security Doctrine of Russia // Economics of the Region. 2012. №2. pp. 40-50.
22. Bushuev V.V. Energy of Russia. - M.: Publishing and Analytical Center "Energy", 2018. 740 p.
23. Bykova EV Methods of calculation and analysis of indicators of energy security. - Chisinau, Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Moldova, 2005. 156 p.
24. Bykova E. V., Grodetsky M. V. Analysis and monitoring of energy security and forecasting of indicator values using conditional non-linear mathematical programming // Economics of the region. 2011. №3. pp. 234-240.
25. Bykova E. V. Investments as a tool for ensuring the energy security of Moldova // Economics. 2013. №3. pp. 47-61.
26. Vasiliev F.P. Optimization methods: in 2 books. Book 1. - M.: MTSNMO, 2011. 620 p.
27. Veselov F. V., Solyanik A. I. Conditions for the development of the electric power industry in Russia within the framework of strict price restrictions in the medium term // Problems of Forecasting. 2020. №1. pp. 88-98.
28. Vilensky P. L. On one approach to accounting for the impact of uncertainty and risk on the effectiveness of investment projects. Voprosy ekonomiki. 2002. No. 4. pp. 24-31.
29. Vilensky P. L. Evaluation of the effectiveness of investment projects: Theory and practice / P. L. Vilensky, V. N. Livshits, S. A. Smolyak. – M.: Delo, 2001. 832 p.
30. Volkova E. A. Prospects for the development of nuclear power plants until the middle of the XXI century / E. A. Volkova, A. A. Makarov, A. S. Makarova, A. A. Khorshev, E. I. Sharov. – M.: ERI RAN, 2010. 212 p.
31. Volkonsky V. A., Kuzovkin A. I. Price and financial problems of the fuel and energy complex. – M.: Nauka, 2008. 254 p.

32. Vorozhtsova T. N., Pyatkova N. I. Ontological model of energy security threats // *Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2017. No. 3(7). C. 35-42.
33. Voronin A. Yu., Malikova OI Globalization of energy markets and economic growth in Russia. - St. Petersburg: LLC "Publishing and Printing Company KOSTA", 2010. 240 p.
34. Voropay N. I., Ivanova E. Yu. Rationale for the development of electric power companies in the conditions of divergent interests of the subjects of relations // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energy*. 2003. No. 2. pp. 39-51.
35. Voropay N. I. Regional problems of energy security in Russia // *Izvestiya akademii nauk. Energy*. 1999. No. 3. pp. 47-55.
36. Voropay N. I., Senderov S. M. Energy security: Essence, main problems, methods and results of research // *Proceedings of the open seminar "Economic problems of the energy complex"*. M.: INP RAN, 2011. 89 p.
37. Galperova E. V., Mazurova O. V. Energy intensity of the world economy: trends and forecasts // *Energy: economics, technology, ecology*. 2018. No. 9. pp. 27-31.
38. Gamm A. Z. Theoretical foundations of system research in the energy sector / A. Z. Gamm, A. A. Makarov, B. G. Saneev et al. - Novosibirsk: Nauka, 1986. 336 p.
39. Gafurov A. R. The essence of the category "energy security" and its place in the overall structure of security // *Bulletin of MSTU*. 2010. V.13, No.1. pp.178-182.
40. Gafurov A. R. Formation of the energy security management system at the regional level // *Economics and Management*. 2009. No. 9. S. 40-44.
41. Gilboa I. Probability and uncertainty in economic modeling / I. Gilboa, E. Postulate, D. Schmeidler // *Voprosy ekonomiki*. 2009. No. 10. pp. 46-61.
42. Glushakova O.V. Evolution of methodology and theory of quality of life in the concepts of foreign and domestic scientific schools // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2006. No. 3. pp. 141-147.

43. Granberg A. G. Mathematical models of the socialist economy. - M.: Economics, 1978. 351 p.
44. Gorelik V. A., Zolotova T. V. On some risk functions and their application in investment problems // Risk management. 2011. №3. pp. 59-64.
45. Gary J. G. Technologies and economics of oil refining / J. G. Gary, M. J. Kaiser, G. E. Handwerk. - St. Petersburg: TsOP "Professiya", 2013. 440 p.
46. Demina O. V. Opportunities and problems of development of energy cooperation in the countries of Northeast Asia in conditions of political instability and energy transition // Spatial Economics. 2022. №3. pp. 194-196.
47. Dmitrievsky A. N. Energy priorities and security of Russia (oil and gas complex) / A. N. Dmitrievsky, A. M. Mastepanov, M. V. Krotova. - M: Gazprom Expo LLC, 2013. 336 p.
48. Dremova L. A. Features of the mechanism of functioning of natural monopolies in a transitive economy - Kursk: Publishing house of the Kursk state. un-ta, 2012. 236 p.
49. Dronova Yu. V. Fundamentals of risk accounting in the development of prospective forecasts of electricity consumption // Energy of Russia in the 21st century: development strategy - the eastern vector. Energy cooperation in Asia: what after the crisis? - Irkutsk: ISEM SO RAN, 2010. P. 672-676.
50. Edelev A. V. Distributed computing environment for vulnerability analysis of critical infrastructures in the energy sector / A. V. Edelev, S. M. Senderov, N. M. Beresneva, I. A. Sidorov, A. G. Feoktistov // Control Systems, communications and security. 2018. №3. pp. 197-231.
51. Egorchenko T. I. The role of energy security in the context of modern problems of socio-economic development // Economics and Management. 2011. №2. pp. 99-102.
52. Zhivetin VB Risks and security of economic systems (mathematical modeling). - M.: Publishing House of the Institute of Risk Problems, LLC Information and Publishing Center "Bon Antsa", 2008. 440 p.

53. Zhiznin S. Z., Timokhov V. M. International energy security and modernization of the Russian fuel and energy complex // *Energy Policy*. 2011. №6. pp. 21-29.
54. Zhukovsky V. I. Risk in multicriteria and conflict systems under uncertainty / V. I. Zhukovsky, L. V. Zhukovskaya; ed. V. S. Molostova. – M.: Editorial URSS, 2004. 272 p.
55. Zyablitsky I. E. Evaluation of fiscal multipliers in the Russian economy // *Economic Journal of the Higher School of Economics*. 2020. №2. pp. 268-294.
56. Ignatieva A. V., Maksimov M. M. Research of control systems. – M.: UNITI-DANA, 2010. 176 p.
57. Study of the Russian economy using models with fuzzy parameters / ed. A. O. Baranova, V. N. Pavlova. - Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2009. 236 p.
58. How to avoid the resource curse / ed. J. Sachs, J. Stiglitz, M. Humphreys. - M.: Publishing House of the Gaidar Institute, 2011. 464 p.
59. Karamov D.N., Maltsev I.A., Ilyushin P.V. et al. Analysis of the world experience in stimulating the development of renewable energy and the possibilities of its application in Russia // *Energetik*. - 2022. - No. 9. - P. 39-49.
60. Karpovich AI Modeling of economic sustainability of energy systems. - Novosibirsk: Publishing House of NSTU, 2006. 260 p.
61. Karpovich AI Defining the category of stability in complex sociotechnical systems / AI Karpovich, AV Nikiforova, AN Poletaikin // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Socio-economic sciences*. 2017. No. 1. pp. 147-163.
62. Kibalov E. B., Kin A. A. Problems of accounting for the uncertainty factor in assessing the expected efficiency of large-scale investment projects // *Region*. 2007. No. 3. pp. 67-91.
63. Kibalov E. B. System analysis of the expected efficiency of large-scale projects / E. B. Kibalov, V. I. Goryachenko, A. B. Khutoretsky. - Novosibirsk: Publishing House of the IEOPP RAN, 2008. 164 p.

64. Kini R. L. Decision making under many criteria: preferences and substitutions / R. L. Kini, H. Rifa; ed. I. F. Shakhnova. - M.: Radio and communication, 1981. 560 p.
65. Kirdina S. G. Institutional matrices and development of Russia. - Novosibirsk: IE i OPP SO RAN, 2001. 301p.
66. Kolibaba VI, Zhabin KV Organizational and economic mechanism of formation of the reactive power market in the electric power industry. - Ivanovo: Ivanovo State Energy University named after. V. I. Lenin, 2021. 184 p.
67. Kokoshin A. A. International energy security. – M.: Europe, 2006. 70 p.
68. Kononov Yu. D. Methods and models of predictive studies of the relationship between energy and economics / Yu. D. Kononov, E. V. Galperova, D. Yu. Kononov, A. V. Lagerev, O. V. Mazurova, V. N. Tyrtyshtny . - Novosibirsk: Nauka, 2009. 178 p.
69. Kononov Yu. D., Kononov D. Yu. Otsenka i ucheta investitsionnykh risky pri prognoznykh issledovaniyakh razvitiya TEK [Evaluation and accounting of investment risks in predictive studies of the development of the fuel and energy complex]. 2018. №2. pp. 72-77.
70. Kononov Yu. D., Kononov D. Yu. The inertia property of the fuel and energy complex and the methodological approach to its research. - Irkutsk: ISEM SO RAN, 2007. 44 p.
71. Kononov Yu. D. Energy and Economics: Problems of Transition to New Energy Sources. – M.: Nauka, 1981. 188 p.
72. Kononov Yu. D., Kononov D. Yu. Economic component of energy security and methodological approaches to its assessment // National interests: priorities and safety. 2019. Vol. 15, No. 6. pp. 927–941.
73. Kononov Yu. D., Kononov D. Yu. Features of taking into account the state of energy security in the multi-criteria assessment of options for the development of the fuel and energy complex // National interests: priorities and security. 2022. No. 5(410). pp. 977-990.



74. Kononov Yu. D., Kononov D. Yu. Evaluation of the competition of power plants // *Electric Stations*. 2009. No. 6. pp. 22-27.
75. Kondrakov O. V. Monitoring as an element of ensuring the energy security of the region // *Socio-economic phenomena and processes*. 2012. №3. pp. 50-54.
76. Kondrakov O. V. Determination of threshold values of indicators of energy security // *Bulletin of the Tambov State University. Series: Humanities*. 2013. No. 9(125). pp. 64-70.
77. Kondrakov O. V. Indicators of assessing the energy security of the region // *Bulletin of TSU*. 2013. No. 5. pp. 64-69.
78. Kondrakov O. V. On the issue of the energy security of the region and the development of the energy sector // *Socio-economic phenomena and processes*. 2012. No. 4 (38). pp. 73-78.
79. Kondrakov O. V. Classification of threats to the energy security of the region // *Socio-economic phenomena and processes*. 2012. No. 7. pp.85-89.
80. Kontorovich A. E. Main trends in the development of the Russian oil complex in the first half of the 21st century / A. E. Kontorovich, L. M. Burshtein, V. R. Livshits, S. V. Ryzhkova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2019. No. 11. pp. 1095-1104.
81. Korzhubaev A. G., Eder L. V. Oil and gas complex of Russia: state, projects, international relations. - Novosibirsk: IEOPP SO RAN, 2011. 296 p.
82. Korzhubaev A.G., Sokolova I.A., Filimonova I.V. Energy supply of the countries of the Pacific Club. - Novosibirsk: IEOPP SO RAN, 2012. 344 p.
83. Korolev V. Yu. Mathematical foundations of risk theory / V. Yu. Korolev, V. E. Bening, S. Ya. Shorgin. – M.: FIZMATLIT, 2011. 620 p.
84. Korostyshevskaya E. M. Innovative component of the economic security of Russia // *Innovations*. 2014. No. 6(188). pp. 34-38.
85. Krivonozhko V. E., Lychev A. V. Modeling and analysis of the activity of complex systems - M.: LENAND, 2013. 256 p.

86. Crisis of the 2010s and the New Energy Civilization / ed. V. V. Bushueva, M. N. Mukhanova. - M.: Publishing house "Energiya", 2013. 272 p.
87. Krotov M. I., Muntiyev V. I. Economic security of Russia: a systematic approach - St. Petersburg: NPK ROST, 2016. 336 p.
88. Kusner Yu. S., Tsarev IG Principles of economic system movement. – M.: FIZMATLIT, 2008. 200 p.
89. Kuchaev A.I. Proposals for improving the efficiency of the energy security system in modern conditions. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energy*. 2017. No. 4. pp. 13-24.
90. Livshits VN Modern problems of evaluating the effectiveness of investment projects / VN Livshits; open seminar "Economic problems of the energy complex". - M.: Institute of National Economic Forecasting, 2000. 60 p.
91. Lisochkina T.V., Kosmatov E.M., Ireshova A. et al. Economic-mathematical methods and decision-making models in the energy sector; ed. P. P. Dolgov, I. Klima. - L. : Publishing house of the Leningrad University, 1991. 224 p.
92. Loktionov V. I. Adaptability of development options for energy systems as an indicator of energy security // *Economic analysis: theory and practice*. 2015. No. 40 (2015). pp. 11-21.
93. Loktionov V. I. Analysis of the level of permissible error of initial data in the process of managing energy systems // *Economic analysis: theory and practice*. 2016. No. 8(455). pp. 43-54.
94. Loktionov V. I. Influence of initial data uncertainty on options for long-term development of the fuel and energy complex // *Economic analysis: theory and practice*. 2015. No. 31 (2015). pp. 51-60.
95. Loktionov V. I. Influence of investment projects on the level of adaptability of energy systems in the tasks of long-term forecasting // *Economic analysis: theory and practice*. 2016. No. 4(451). pp. 46-56.
96. Loktionov V. I. Investment attractiveness of the fuel and energy complex of the region as an aspect of energy security // *National interests: priorities and security*. 2013. No. 18(207). pp. 44-49.

97. Loktionov V.I. Using world experience in assessing energy security in relation to Russia // *Energy Policy*. 2013. №3. pp. 3-9.

98. Loktionov V. I. Methodological substantiation of the development of a system of measures aimed at improving the adaptability of the national energy system // *National interests: priorities and safety*. 2019. Vol. 15, No. 7. pp. 1305–1324.

99. Loktionov V. I. New investment cycle: modern financial mechanisms for the development of the energy sector // *Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics*. 2021. №5. pp. 64-77.

100. Loktionov V.I. Risk assessment and effectiveness of options for implementing the national energy strategy // *Risk Management*. 2020. №1. pp. 47-55.

101. Loktionov V. I., Kononov Yu. D. Risk assessment in entrepreneurship in the analysis of the effectiveness of large-scale projects in the fuel and energy complex. - Irkutsk: Publishing House of BGUEP, 2012. 143 p.

102. Loktionov V. I. Evaluation of the effectiveness of investment projects in the energy sector, taking into account marginal prices for energy carriers. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2014. No. 33. pp. 17-22.

103. Loktionov V.I. Principles and criteria for assessing the adaptability of energy systems // *National interests: priorities and safety*. 2017. V. 13, No. 12. S. 2335-2348.

104. Loktionov V. I. Russia on the way to sustainable energy // *National interests: priorities and security*. 2018. Vol. 14, No. 4. pp. 725-740.

105. Loktionov V.I. The property of adaptability as a criterion for the effectiveness of investment projects in the fuel and energy complex // *Economic analysis: theory and practice*. 2013. No. 6(309). pp. 46-50.

106. Loktionov V. I. Strategic threats to energy security as risks of reducing the quality of life of the population // *National interests: priorities and security*. 2020. V. 16, No. 4. S. 730-744.

107. Loktionov V. I. Evolution of the concept of energy security // *National interests: priorities and security*. 2019. Vol. 15, No. 5. pp. 927–941.

108. Loktionov V. I. Sustainable energy as a tool to reduce the impact of energy security threats on the quality of life of the population // *Baikal Research Journal*. 2020. Vol. 11, No. 4.

109. Loktionov V. I., Loktionova E. A. Economic and energy systems: the evolution of structural ties during the transition to a new paradigm of socio-economic development. *Bulletin of the Baikal State University*. 2021. V. 31, No. 3. S. 303–313.

110. Loktionov V.I., Mazurova O.V. Investment deficit as a strategic threat to the energy security of Russia // *National interests: priorities and security*. 2018. V. 14, No. 7. S. 1305-1318.

111. Loktionov V. I., Mazurova O. V., Galperova E. V. Prospective assessment of demand for electricity in the Russian Federation and regions, taking into account in-depth electrification // *Economics of the region*. 2022. Vol. 18, No. 2. pp. 528-541.

112. Lvov D.S. *Development Economics*. – M.: Exam, 2002. 512 p.

113. Mayburov I. A. Prospects for improving environmental taxation / I. A. Maiburov, Yu. B. Ivanov, Zh. I. Lyalina // *Innovative development of the economy*. 2018. No. 4(46). pp. 7-13.

114. Makarov A. A., Veselov F. V. Study of the adaptation of the Russian energy sector to the post-crisis development of the economy. – M.: MPEI Publishing House JSC, 2018. 184 p.

115. Makarov A. A., Melentiev L. A. *Methods of research and optimization of the energy sector*. - Novosibirsk: Nauka, 1973. 276 p.

116. Makarov A. A., Mitrova T. A., Malakhov V. A. Forecast of world energy and consequences for Russia // *Problems of Energy*. 2013. No. 6. pp. 17-29.

117. Makarova G.N. *Economic risks: structure and management methods*. - Irkutsk: Ed. IGEA, 1999. 120 p.

118. Malikova O. I. Branch structure and competition in the world energy market / O. I. Malikova, V. V. Vutyaynov, A. B. Davydenko, V. I. Chalov. - M: MAKS Press, 2012. 204 p.

119. Markovskaya E. I. Theoretical and practical aspects of the formation of mechanisms for adapting economic entities / E. I. Markovskaya. - St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University of Economics, 2017. 150 p.

120. Massel L. V., Pyatkova E. V. Analysis of energy security threats using Bayesian trust networks // Methodological issues of researching the reliability of large energy systems. Issue. 61. Problems of research and ensuring the reliability of liberalized energy systems. - Irkutsk: ISEM SO RAN, 2011. P. 439-446.

121. Massel L. V. Adaptation of situational management methods for solving problems of assessing the impact of threats on the state of energy security / L. V. Massel, N. I. Pyatkova, A. G. Massel // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2016. No. 1. pp. 28-38.

122. Massel L. V., Pyatkova E. V. Application of Bayesian trust networks for intellectual support of energy security research // Bulletin of ISTU. 2012. No. 2(61). pp. 8-13.

123. Mastepanov A. M. Problems of ensuring energy security in conditions of high geopolitical, environmental, economic and technological uncertainty / A. M. Mastepanov, V. V. Bushuev, N. I. Voropay et al. // Fundamental basis of innovative technologies in the oil and gas industry. industry: abstracts of the All-Russian Scientific Conference dedicated to the 30th anniversary of the Institute of Oil and Gas Research, Russian Academy of Sciences, 2017, pp. 108-109.

124. Mednitsky V. G. Large-scale investment projects: Modeling and economic evaluation / V. G. Mednitsky, R. V. Fattakhov, S. P. Bushansky; resp. ed. Yu. V. Ovsienko. – M.: Nauka, 2003. 264 p.

125. Melentiev L. A., Shteingauz E. O. Economics of energy in the USSR. - M.: State Energy Publishing House, 1963. - 431 p.

126. Melentiev L. A. System research in the energy sector. Elements of the theory, directions of development. – M.: Nauka, 1979. 415 p.

127. Methods and models of coordination of hierarchical decisions / otv. ed. A. A. Makarov. - Novosibirsk: Nauka, 1979. 240 p.

128. Mierin L. A. Safety of business entities in an unstable environment. - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics and Finance, 1999. 207 p.

129. Mierin L. A., Markovskaya E. I. A quantitative approach to assessing the adaptability of economic entities. Bulletin of the St. Petersburg State University of Economics. 2021. No. 1(127). pp. 27-34.

130. Mierin L. A., Khoreva L. V. Social innovation strategies and the risks of ignoring them // Bulletin of the Pacific State University. 2022. No. 3(66). pp. 51-62.

131. Modernization of industry and development of high-tech industries in the context of "green" growth / B. N. Porfiriev, A. Yu. Kolpakov, V. V. Semikashev, Yu. V. Sinyak et al.; resp. ed. B. N. Porfiriev – M.: Scientific Consultant LLC, 2017. 434 p.

132. Mozhaeva SV Economics of energy production / SV Mozhaeva. - St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2011. 272 p.

133. Muntiyan V. I., Bocharov V. E. Economic prerequisites for ensuring financial security // Economics and Management: Problems, Solutions. 2020. No. 11. S. 83-95.

134. Myzin A. L. Comparative assessment of energy investment attractiveness of regions: method and approbation / A. L. Myzin, P. E. Mezentsev, O. A. Denisova, P. A. Pykhov // Economics of the region. 2007. No. 4. pp. 207-220.

135. Reliability of energy systems: Problems, models and methods of their solution / otv. ed. N. I. Voropay. Novosibirsk: Nauka, 2014. 283 p.

136. National accounts of Russia in 2013-2020: Stat. Sat / H35 Rosstat. - M.: 2021. 429 p.

137. Nekrasov AS Analysis and forecasts for the development of fuel and energy complex industries. - M.: OOO "Leto Industries", 2013. 592 p.

138. Nekrasov AS Scientific and methodological support of innovative development of energy systems. M.: Creative economy, 2011. 184 p.

139. Ognev A. Yu. Cooperation between Russia and China in the field of electric power industry // Regionalistics. 2015. №3. pp. 51-58.

140. Essays on economic synergetics / ed. V. I. Maevsky, S. G. Kirdina-Chandler, M. A. Deryabina. – M.: IE RAN, 2017. 182 p.

141. Okorokov R. V., Sokolov Yu. A., Okorokov V. R. Financial security of electric power companies: theory and management methodology. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2007. 360 p.

142. Ostrovsky GM, Volin Yu. M. Technical systems under uncertainty. – M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2008. 319 p.

143. Pavlov A. V., Pavlov V. N. Fuzzy random methods for studying uncertainty and their macroeconomic applications. - Novosibirsk: IEOPP SO RAN, 2012. 188 p.

144. Pogodina T.V., Kuznetsov N.V., Abikeev N.M. Financial and economic mechanisms for creating innovative territorial clusters // Bulletin of the Financial University. 2016. No. 5. pp. 26-36.

145. Polyakova M.R. Facing the East: Potential for Electricity Exports from Russia to China // Security Issues. 2016. No. 1. S. 27-38.

146. Forecast for the development of energy in the world and Russia 2016 / ed. A. A. Makarova, L. M. Grigorieva, T. A. Mitrova; ERI RAS - AC under the Government of the Russian Federation. – M.: ERI RAN, 2016. 196 p.

147. Porfiryev B. N. Economic dimension of the climate challenge of sustainable development in Russia // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019. No. 4. pp. 400-407.

148. Porfiryev B.N. New global trends in the development of the energy industry – challenges and risks of Russia's integration into the world economy // Problems of Forecasting. 2015. No. 1. pp. 45-52.

149. Porfiryev B. N., Roginko S. A. Alternative energy and socially oriented economy // Bulletin of St. Petersburg University. Economy. 2016. №3. pp. 4-19.

150. Pu T. Nonlinear economic dynamics. - Moscow-Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2000. 198 p.

151. Pyatkova N. I., Beresneva N. M. Modeling of critical energy infrastructures taking into account the requirements of energy security // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2017. №3. pp. 54-65.

152. Pyatkov B. V., Massel A. G. Analysis of energy security threats based on semantic and linear optimization models for the development of the fuel and energy complex // Analysis, modeling, management, development of socio-economic systems (AMUR-2022). collection of scientific papers of the XVI International School-Symposium AMUR-2022. Simferopol, 2022. S. 313-314.

153. Pyatkova N. I. Energy security of Russia: problems and solutions / N. I. Pyatkova, V. I. Rabchuk, S. M. Senderov, N. I. Voropai. - Novosibirsk: Publishing house of SO RAN, 2011. 198 p.

154. Rabchuk V. I., Senderov S. M., Vorobyov S. V. Problems of ensuring the energy needs of Russia until 2030 in the implementation of strategic threats to energy security // Energy Policy. 2017. No. 1. pp. 84-94.

155. Distributed energy in Russia: development potential / A. Khokhlov, Yu. Melnikov, F. Veselov et al. - M.: Skolkovo, 2018. P. 89.

156. Saltanov A. G. Approaches to assessing the effectiveness of the risk management system of energy companies // Problems of risk analysis. 2011. №3. pp. 16-27.

157. Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. The influence of the implementation of the eastern vector of Russia's energy strategy on the energy efficiency of the region's economic complex // Region: Economics and Sociology. 2020. No. 1. S. 3-27.

158. Saneev B.G., Platonov L.A., Maysyuk E.P., Izhbuldin A.K. Gas chemical complexes in the east of Russia: prerequisites for creation // Energy Policy. 2008. No. 4. pp. 68-76.

159. Semikashev VV System of models for analysis and forecasting of the development of the world and Russian economy and energy / VV Semikashev, A. Yu. Kolpakov et al. // Oil industry. 2015. No. 11. pp. 6-11.



160. Semikashev V.V. Economic policy for the Russian fuel and energy sector under sanctions // *Energy Policy*. 2022. No. 8. pp. 28-41.

161. Senderov S. M., Smirnova E. M. Indicative analysis of trends in ensuring the energy security of the Siberian and southern federal districts of Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energy*. 2022. No. 3. pp. 12-28.

162. Senderov S. M., Rabchuk V. I. Energy security today and the main methods of ensuring it. *Energy Policy*. 2022. No. 11. S. 56-69.

163. Senderov S. M. Features of the formation of a list of critically important facilities of the gas transmission network of Russia, taking into account the requirements of energy security and possible measures to minimize the negative consequences of emergency situations at such facilities / Senderov S. M., Rabchuk V. I., Edelev A. V. // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2016. No. 1. pp. 70-78.

164. Senderov S. M., Rabchuk V. I. State of Energy Security of Russia at the Federal Level: Methodical Approach to Assessment and Main Results. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energy*. 2018. №2. pp. 3-18.

165. Senderov S. M., Smirnova E. M. Methods for assessing and analyzing the level of energy security // *Academy of Energy*. 2009. No. 6. pp. 30-40.

166. Senderov S. M., Smirnova E. M. Energy security of Russian regions: state and trends of change over the past six years // *Energy Policy*. 2018. No. 1. pp. 16-23.

167. Senchagov VK *Economic security of Russia*. – M.: Delo, 2009. 654 p.

168. Sinyak Yu. V. New phenomena in the global energy sector and their consequences for Russia // *INTEREXPO GEO-SIBERIA*. 2016. No. 4. pp. 242-246.

169. Sinyak Yu. V. Influence of climatic risks on the pace and structure of development of the Russian fuel and energy complex in the first half of the 21st century // *Forecasting economic growth: materials of the international scientific conference*. 2017. S. 193-207.

170. Sinyak Yu. V. Fuel and energy complex of Russia: opportunities and prospects / Yu. V. Sinyak, A. S. Nekrasov, S. A. Voronina, V. V. Semikashev, A. Yu. Kolpakov // *Problems of Forecasting*. 2013. No. 1(136). pp. 4-21.

171. Sinyak Yu. V. Innovative factor in the prospective development of the Russian fuel and energy complex / Yu. V. Sinyak, A. S. Nekrasov, S. A. Voronina, V. V. Semikashev // *Scientific Works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*. 2011. No. 9. S. 8-43.

172. *System Research in Energy: Methodology and Results* / ed. A. A. Makarova, N. I. Voropay. - M.: ERI RAN, 2018. 309 p.

173. Smil V. *Energy: myths and reality. Scientific approach to the analysis of world energy policy*. – M.: AST-PRESS KNIGA, 2012. 272 p.

174. Smirnov V. A. *Problems of increasing flexibility in the energy sector*. – M.: Nauka, 1989. 192 p.

175. Smirnov VA *Processes of adaptation in the development of energy*. – M.: Nauka, 1983. 196 p.

176. Smirnov K.S. *Comprehensive assessment of projects for the export of Russian electricity from Eastern Siberia to China* // *Bulletin of ISTU*. 2017. No. 10. pp. 131-137.

177. Sokolova E. *Kovykta - an incentive for development* // *Irkutsk Province*. 2004. No. 5. pp. 22-25.

178. Suslov K. V. *Technical and economic aspects of the use of renewable energy sources* / K. V. Suslov, V. Yu. Konyukhov, T. I. Zimina, N. A. Shamarova. - Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2014. 219 p.

179. Suslov N. I. *Analysis of interactions between the economy and energy in the period of market transformations*. - Novosibirsk: IEiOPP SO RAN, 2002. 270 p.

180. Suslov N. I. *Energy in Russia in the next 20 years: an economist's view* // *ECO*. 2013. No. 8(470). pp. 79-96.

181. Suslov N. I., Buzulutskov V. F. *Modeling and analysis of intersectoral and interregional relationships in the development of the energy sector of Russia* // *Interexpo GEO-Siberia*. 2017. No. 2. S. 18-27.

182. Suslov N.I. *Renewable energy sources in a country where there are many traditional energy resources* // *EKO*. 2014. No. 3 (477). pp. 69-88.

183. Tarasov A. E. Comparative analysis of options for the supply of synthetic liquid fuel and gas from the Kovykta gas condensate field for export // *Energy Policy*. 2008. No. 4. pp.62-67.
184. Telegin E. A. Energy markets and energy security in the first quarter of the 21st century: new challenges // *Energy Policy*. 2011. №6. pp. 9-14.
185. Terentiev N. E. "Green" energy in the system of technologies of the new industrial revolution // *Scientific works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*. 2016. No. 14. pp. 226-240.
186. *Fuel and Energy Complex and the Russian Economy: Yesterday, Today, Tomorrow (1990-2010-2030)* / ed. Yu. K. Shafranik - M.: Publishing Center "ENERGY", 2011. 488 p.
187. *Management of development of large-scale systems* / ed. A. D. Tsvirkun. - M.: Publishing house of physical and mathematical literature, 2012. 496 p.
188. Urazgaliev V. Sh. Challenges, risks and opportunities of the Russian economy in the context of the energy transition. *Sovremennye tekhnologii upravleniya*. 2022. No. 4(100). 10004.
189. Urazgaliev V. Sh., Titkov M. V. The gas component of the energy security of Russia // *Bulletin of the St. Petersburg State University. Economy*. 2018. №2. C 176-216.
190. Filimonova I. V. Comprehensive economic analysis of Russian oil and gas companies / I. V. Filimonova, L. V. Eder, V. Yu. Nemov, M. V. Mishenin // *Economic analysis: theory and practice*. 2019. V. 18. No. 5(488). pp. 925-943.
191. Fortov V. E. Global energy security / V. E. Fortov, A. A. Makarov, T. A. Mitrova // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2007. Vol. 77, No. 2. pp. 99-107.
192. *Digital transition in the electric power industry of Russia* / ed. V. N. Knyaginina, D. V. Kholkina. - M.: Center for Strategic Research, 2007. P. 47.
193. Chernikov A. P., Orsoeva M. V. Energy security as a factor in sustainable development of the region. - Irkutsk: Baikal State University of Economics and Law, 2008. 173.

194. Shevchuk L. M. Risk analysis in strategic planning for large energy companies / L. M. Shevchuk, A. S. Lukyanov, A. A. Kudryavtsev // *Izvestiya akademii nauk. Energy*. 2000. No. 2. pp. 52-64.
195. Shchelokov Ya. M. Energy analysis of economic activity: energy problems of energy production. - Yekaterinburg: UrFU, 2010. 390 p.
196. Eder L. V., Kontorovich A. E. The need to change the paradigm of the development of the oil and gas complex in Russia // *Interexpo Geo-Siberia*. 2017. No. 1. pp. 16-23.
197. Eder L. V., Filimonova I. V. Economics of the Russian oil and gas sector // *Economic Issues*. 2012. No. 10. S. 76-91.
198. Energy security of Russia / V. V. Bushuev, N. I. Voropai, A. M. Mastepanov, Yu. K. Shafranik et al. - Novosibirsk: Nauka, 1998. 302 p.
199. Energy security. Terms and definitions / otv. ed. N. I. Voropay. - M.: IAC "Energia", 2005. 60 p.
200. Energy and geopolitics / V. V. Kostyuk, A. A. Makarov, T. A. Mitrova et al. - M.: Publishing house "Nauka", 2011. 397 p.
201. Yusifbeyli N. A., Nasibov V. Kh. Models for the study of the energy security of Azerbaijan // *Energy Policy*. 2013. №3. pp. 50-58.
202. Alam M. S. A model for the quality of life as a function of electrical energy consumption / M. S. Alam, B. K. Bala, A. M. Z. Huq, M. A. Matin // *Energy*. 1991. Vol. 16, iss. 4. pp. 739-745. doi: 10.1016/0360-5442(91)90023-F
203. Ang B. W., Choong W. L., Ng T. S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 42. pp. 1077-1093. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.064
204. Anton S. G., Nucu A. E. F. The effect of financial development on renewable energy consumption. A panel data approach // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. pp. 330-338. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.005.
205. A Quest for Energy Security in the 21st Century: Resources and Constraints / Asia Pacific Energy Research Centre. – Tokyo: Institute of Energy Economics, 2007. 100 p.

206. Arakawa F., Mori S., Torigoe T. Energy Security Model // IFAC Proceedings.1989. Vol. 22(17). pp. 87-92.

207. Augutis J., Krikstolaitis R., Martisauskas L., Peciulyte S. Energy security level assessment technology // Applied Energy. 2012. Vol. 97. pp. 143-149. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.032

208. Baldwin D. A. The concept of security // Review of International Studies. 1997. Vol. 23. pp. 5-26.

209. Bamberg J. British Petroleum and global oil 1950-1975. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 637 p.

210. Bashmakov I. A., Makarov A. A. An energy development strategy for the USSR. Minimizing greenhouse gas emissions // Energy policy. 1991. Vol. 19, №10. pp. 987-994.

211. Becker P. The Role of Synthetic Fuel in World War II Germany: Implication for today // Air University Review. 1981. Vol. 32, iss. 5. pp. 45-53.

212. Below A. Obstacles in energy security: an analysis of congressional and presidential framing in the United States // Energy Policy. 2013. Vol. 62. pp. 860-868. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.013

213. Berglund T., Modén L. Optimization of the power production system taking into consideration security in supply, load and different types of production // Electrical Load-Curve Coverage. 1977. pp. 65-76. doi: 10.1016/B978-0-08-022422-0.50010-6

214. Bielecki J. Energy security: is the wolf at the door? // The Quarterly Review of Economics and Finance. 2002. Vol. 42. pp. 235-250.

215. Binder C. R., Mühlemeier S., Wyss R. Indicator-based approach for analyzing the resilience of transitions for energy regions. Part I: Theoretical and conceptual considerations // Energies. 2017. Vol. 10, iss. 36. doi: 10.3390/en10010036

216. Blyth W., Lefevre N. Energy security and climate change policy interactions. – Paris: International Energy Agency, 2004. 88 p.

217. Blum H., Legey L. F. L. The challenging economics of energy security: ensuring energy benefits in support to sustainable development // *Energy Economics*. 2012. Vol. 34, iss. 6. pp. 1982-1989. doi: 10.1016/j.eneco.2012.08.013
218. Bohi D. R., Toman M. A. *The Economics of Energy Security*. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996. 152 p.
219. Brand U., Gleich A. Transformation toward a secure and precaution-oriented energy system with the guiding concept of resilience—implementation of low-exergy solutions in Northwestern Germany // *Energies*. 2015. Vol.8. pp. 6995-7019. doi: 10.3390/en8076995
220. Cherp A., Jewell J. The concept of energy security: Beyond the four As // *Energy Policy*. 2014. Vol. 75. pp. 415-421. doi: 10.1016/j.enpol.2014.09.005
221. Cherp A. Defining energy security takes more than asking around // *Energy Policy*. 2012. Vol. 48. pp. 841-842. doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.016
222. Chester L. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature // *Energy policy*. 2010. Vol. 38, iss. 2. pp. 887-895. doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.039
223. Coaffee J. Risk, resilience, and environmentally sustainable cities // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, iss. 12. pp. 4633-4638. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.048
224. Cohen G., Joutz F., Loungani P. Measuring energy security: trends in the diversification of oil and natural gas supplies // *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. pp. 4860-4869.
225. Colglazier E. W., Deese D. A. Energy and security in the 1980s // *Annual Review of Energy*. 1983. Vol. 8(1). pp. 415-449.
226. Costanza R. Quality of Life: An Approach Integrating Opportunities, Human Needs, and Subjective Well-Being // *Ecological Economics*. 2007. Vol. 61. pp. 267-276. doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.02.023
227. Cox E. Assessing long-term energy security: The case of electricity in the United Kingdom // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. pp. 2287-2299. doi: 10.1016/j.rser.2017.08.084

228. Cuadra L., Salcedo-Sanz S., Ser J. D., Jiménez-Fernández S., Geem Z. W. A critical review of robustness in power grids using complex networks concepts // *Energies*. 2015. Vol. 8. pp. 9211-9265, 2015. doi: 10.3390/en8099211
229. Deese D. A. Energy: economics, politics, and security // *International Security*. 1979. Vol. 4, iss. 3. pp. 140-153.
230. Drexel K. The US Department of Defense: Valuing Energy Security // *Journal of Energy Security*, June 2009.
231. Dresner S. The principles of sustainability. – London: Earthscan, 2008. 205 p.
232. Dunn L., Dunn R. W&J Energy Index. – Washington: Jefferson College, 2012. 44 p.
233. Effective Carbon Rates: Pricing CO<sub>2</sub> through Taxes and Emissions Trading Systems. – Paris: OECD Publishing, 2016. 172 p.
234. Energy security in the era of climate change: The Asia-Pacific experience / edited by L. Anceschi, J. Symons. – New York: Palgrave macmillan, 2012. 299 p.
235. Energy technology perspectives 2010. Scenarios and strategies to 2050. OECD. – Paris: International Energy Agency (IEA), 2010. 706 p.
236. Energy supply security: the emergency response of IEA countries. – Paris: International Energy Agency, 2015. 606 p.
237. Fabra N., Motta M, Peitz M. Learning from electricity markets: How to design a resilience strategy // *Energy policy*. 2022. №168. 113116. doi: 10.1016/j.enpol.2022.113116
238. Farfan J., Breyer Ch. Aging of European power plant infrastructure as an opportunity to evolve towards sustainability // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, iss. 28. pp. 18081-18091. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.138
239. Filipovic S., Radovanovic M., Golusinc V. Macroeconomic and political aspects of energy security – Exploratory data analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 97. pp. 428-435. doi: 10.1016/j.rser.2018.08.058

240. Finke J., Bertsch V. Implementing a highly adaptable method for the multi-objective optimization of energy systems // *Applied Energy*. 2023 Vol. 332, 120521. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120521

241. Gasper D. Understanding the diversity of conceptions of well-being and quality of life // *The Journal of Socio-Economics*. 2010. Vol. 39, iss. 3. pp. 351-360. doi: 10.1016/j.socec.2009.11.006

242. Georgiou G. C. US energy security and policy options for the 1990s // *Energy Policy*. 1993. Vol. 21, iss. 8. pp. 831-839. doi: 10.1016/0301-4215(93)90168-F

243. Gibson R. B., Holtz S., Tansey J., Whitelaw G. Sustainability assessment: criteria and processes. – London: Taylor & Francis, 2005. 278 p.

244. Global Energy Architecture Performance Index. Report 2017. World Energy Forum, 2017. 32 p.

245. Gökgöz F., Güvercin M. T. Energy security and renewable energy efficiency in EU // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 96. pp. 226-239. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.046

246. Goldthau A., Witte J. M. Global energy governance: the new rules of the game. – Berlin: Global public policy institute, 2010. 372 p.

247. Golpira H., Bahramara S. Internet-of-things-based optimal smart city energy management considering shiftable loads and energy storage // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 264. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121620

248. Gupta E. Oil Vulnerability Index of oil-importing countries // *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, iss. 3. pp. 1195-1211. doi: 10.1016/j.enpol.2007.11.011

249. Haas R., Nakicenovic N., Ajanovic A. Towards of sustainability of energy systems: A primer of how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies // *Energy Policy*. 2008. Vol.36, iss. 11. pp. 4012-4021. doi: 10.1016/j.enpol.2008.06.028

250. Haimés Y. Y. On the definition of resilience in systems // *Risk Analysis*. 2009. Vol. 29(4). pp. 498-501. doi: 10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x



251. Handbook on Constructing Composite Indicators: methodology and user guide. – Paris: OESD, 2008. 152 p.
252. He P., Ng T. S., Su B. Energy-economic recovery resilience with Input-Output linear programming models // *Energy Economics*. 2017. Vol. 68. pp. 177-191. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.007>
253. Henry D., Ramirez-Marquez H. E. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time // *Reliability engineering & system safety*. 2012. Vol. 99. pp. 114-122. doi: 10.1016/j.ress.2011.09.002
254. Hernández D. Understanding “energy insecurity” and why it matters to health // *Social Science & Medicine*. 2016. Vol. 167. pp. 1-10. doi: 10.1016/j.socscimed.2016.08.029
255. Hippel von D., Savage T., Hayes P. Introduction to the Asian energy security project: project organization and methodologies // *Energy policy*. 2011. №39. pp. 6712-6718.
256. Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. Vol. 4. pp. 1-23.
257. Holling C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems // *Ecosystems*. 2001. Vol. 4, iss. 5. – pp. 390-405.
258. Howell S., Rezgui Y., Hippolyte J, Jayan B., Li H. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 77. pp. 193-214. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.280
259. Hughes L. A generic framework for the description and analysis of energy security in an energy system // *Energy Policy*. 2012. vol. 42. pp. 221-231. doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.079
260. Hughes L. The four ‘R’s of energy security // *Energy policy*. 2009. vol. 37, iss. 6. pp. 2459-2461. doi: 10.1016/j.enpol.2009.02.038
261. Hughes L. The effects of event occurrence and duration on resilience and adaptation in energy systems // *Energy*. 2015. Vol. 84. pp. 443-454. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.010

262. Ibanez E., Lavrenz S., Gkritza K., Mejia-Giraldo D. A., Krishnan V., McCalley J. D., Somani A. K. Resilience and robustness in long-term planning of the national energy and transportation system // *International Journal of Critical Infrastructures*. 2016. Vol. 12. pp. 82-103. doi: 10.1504/IJCIS.2016.075869

263. Ikerd J. *The essentials of economic sustainability*. – Sterling: Stylus publishing, 2012. 150 p.

264. *International Index of Energy Security Risk: Assessing Risk in a Global Energy Market* / Global Energy institute U.S. Chamber of Commerce, 2018. 80 p.

265. Isiklar G., Lahiri K. How far ahead can we forecast? Evidence from cross-country surveys // *International journal of forecasting*. 2007. № 23. pp. 167-187.

266. Jackson J. Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools // *Energy policy*. 2010. № 38. pp. 3865-3873.

267. Jansen J.C., Seebregts A. Long-term energy services security: What is it and how can it be measured and valued? // *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. pp. 1654-1664. doi: 10.1016/j.enpol.2009.02.047

268. Jeong H., Kim Y., Lee Y., Ha K., Won B., Lee D., Hahn D. A «must-go path» scenario for sustainable development and the role of nuclear energy in the 21st century // *Energy policy*. 2010. Vol. 38, iss. 4. pp. 1962-1968. doi: 10.1016/j.enpol.2009.11.077

269. Jevons W. S. *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. – London: Macmillan, 1866. 411 p.

270. Jewell J. *The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES). Primary Energy Sources and Secondary Fuels*. – Paris: International Energy Agency, 2011. 43 p.

271. Kester J. *The politics of energy: critical security studies, new materialism and governmentality*. – New York: Routledge, 2018. 248 p.

272. Khatuaa P. K., Ramachandaramurthy V. K., Kasinathan P., Yonga J. Y., Pasupuleti J., Rajagopalan A. *Application and assessment of internet of things toward*

the sustainability of energy systems: Challenges and issues // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 53. doi: 10.1016/j.scs.2019.101957

273. Kirshen D. S., Strbac G. Fundamentals of power system economics. – London: John Wiley and Sons, Ltd, 2004. 284 p.

274. Kisel E., Hamburg A., Härm M., Leppiman A., Ots M. Concept for energy security matrix // Energy policy. 2016. Vol. 95. pp. 1-9. doi: 10.1016/j.enpol.2016.04.034

275. Klein R., Nicholls R., Thomalla F. Resilience to natural hazards: how useful is this concept? // Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards. 2003. Vol. 5. pp. 35-45. doi: 10.1016/j.hazards.2004.02.001

276. Knuth S. «Breakthroughs» for a green economy? Financialization and clean energy transition // Energy Research & Social Science. 2018. Vol. 41. pp. 220-229. doi: 10.1016/j.erss.2018.04.024

277. Kruyt B., Van Vuuren D. P., De Vries H. J. M, Groenenber H. Indicators for energy security // Energy policy. 2009. vol. 37, iss. 6. pp. 2166-2181.

278. Kwasinski A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level // Energies. 2016. Vol. 9, iss. 93. doi: 10.3390/en9020093

279. Kirshen D. S., Strbac G. Fundamentals of power system economics. – London: John Wiley and Sons, 2004. 284 p.

280. Kononov Y. D. The Effect of Length of Forecast Horizon on Rational Aggregation in Long-Term Forecasting of Energy Systems Development / Y. D. Kononov, D. Y. Kononov, S. V. Steklova // Energy Systems Research. 2018. Vol. 1, iss. 1. pp. 51-56.

281. Lafferty W. M., Meadowcroft J. Implementing sustainable development: strategies and initiatives in high consumption societies. – London: Oxford University Press, 2000. 544 p.

282. Lambert J. G., Hall C. A. S., Balogh S. B., Gupta A., Arnold M. Energy, EROI and quality of life // Energy Policy. 2014. Vol. 64. pp. 153-167. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.001

283. Le C. C., Paltseva E. Measuring the security of external energy supply in the European Union // *Energy Policy*. 2009. Vol. 37, iss. 11. pp. 4474-4481. doi: 10.1016/j.enpol.2009.05.069

284. Le T., Nguyen C. P. Is energy security a driver for economic growth? Evidence from a global sample // *Energy Policy*. 2019. Vol. 129. pp. 436-451. doi: 10.1016/j.enpol.2019.02.038

285. Lei Y., Liang Z., Ruan P. Evaluation on the impact of digital transformation on the economic resilience of the energy industry in the context of artificial intelligence // *Energy Reports*. 2023. № 9(2023). pp. 785-792.

286. Lin Y., Bie Z. Study on the resilience of the integrated energy system // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 103. pp. 171-176. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.268

287. Liu B., Matsushima J. Annual changes in energy quality and quality of life: A cross-national study of 29 OECD and 37 non-OECD countries // *Energy Reports*. 2019. Vol. 5. pp. 1354-1364. doi: 10.1016/j.egypro.2019.09.040

288. Liu L., Chena T., Lina Y. Energy consumption and quality of life: Energy efficiency index // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 88. pp. 224-229. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.152

289. Loktionov V. I., Business barriers to the Russian sustainable energy transition // *Geopolitics of Energy*. 2018. Vol. 40, iss. 10. pp. 2-6.

290. Loktionov V. I. Energy consumption, GHG emissions and quality of life: The case of Russia's institutional transition to sustainability // *Geopolitics of Energy*. 2020. Vol. 42, iss. 3. pp. 2-5.

291. Loktionov V. I. Energy resilience assessment in the period of transition to sustainable energy // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE. 2018. pp. 1-7. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602622

292. Loktionov V. I. Nuclear Power and the Russian energy security strategy // *Geopolitics of Energy*. 2017. Vol. 39, iss. 2. pp. 2-8.

293. Loktionov V. I. Russian policy on the European energy security // *Geopolitics of Energy*. 2016. Vol. 38, iss. 5 and 6. pp. 2-11.

294. Loktionov V. I. The Russian Energy Policy: On the Way to Sustainability // *Geopolitics of Energy*. 2017. Vol. 39, iss. 8. pp. 8-12.

295. Loktionov V. I., Loktionova E. A. Development of the Russian energy system resilience: Towards a more secure future // *Geopolitics of Energy*. 2019. Vol. 41, iss. 4. pp. 9-12.

296. Löschel A., Moslener U., Rübhelke D. T. G. Indicators of energy security in industrial countries // *Energy policy*. 2010. Vol. 38., iss. 4 pp. 1665-1671. doi: 10.1016/j.enpol.2009.03.061

297. Lubell H. Security of supply and energy policy in Western Europe // *World Politics*. 1961. Vol. 13(3). pp. 400-422. doi: 10.2307/2009482

298. MacGill I. F., Vithayasrichareon P. A Monte Carlo based decision-support tool for assessing generation portfolios in future carbon constrained electricity industries // *Energy policy*. 2012. №41. pp. 374-392.

299. Manne A. S., Roland K., Stephan G. Security of supply in the Western European market for natural gas // *Energy Policy*. 1986. Vol. 14(1). pp. 52-64. doi: 10.1016/0301-4215(86)90089-3

300. Martišauskasa L., Augutisa J., Krikštolaitisa R. Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions // *Energy Strategy Reviews*. 2018. Vol. 22. pp. 106-118. doi: 10.1016/j.esr.2018.08.007

301. Maryonoa Wijayaa H. B., Widjonarkoa P. Energy resilience assessment by using SEM approach in the Central Java Province, Indonesia // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 227. pp. 146-151. doi: 10.1016/j.sbspro.2016.06.055

302. Matzenberger J., Hargreaves N., Raha D., Dias P. A novel approach to assess resilience of energy systems. *International journal of disaster resilience in the built environment*. 2015. Vol. 6, iss 2. pp. 168-181. doi: 10.1108/IJDRBE-11-2013-0044

303. Mayer A., Smith E. K. Exploring the link between energy security and subjective well-being: a study of 22 nations // *Energy, Sustainability and Society*. 2019. Vol. 9. doi: 10.1186/s13705-019-0216-1

304. Mazur A. Does increasing energy or electricity consumption improve quality of life in industrial nations? // *Energy Policy*. 2011. Vol. 39. pp. 2568-2572. doi: 10.1016/j.enpol.2011.02.024

305. Mimica M, Urtasun L., Krajačić J. A robust risk assessment method for energy planning scenarios on smart islands under the demand uncertainty // *Energy*. 2022. Vol. 240. 122769.

306. Mohn K., Misund B. Investment and uncertainty in the international oil and gas industry // *Energy economics*. 2009. №31. pp. 240-248.

307. Molyneaux L., Brownb C., Wagner L., Foster J. Measuring resilience in energy systems: Insights from a range of disciplines // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. pp. 1068-1079, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.063>

308. Molyneaux L. Resilience and electricity systems: A comparative analysis / L. Molyneaux, L. Wagner, C. Froome, J. Foster // *Energy policy*. 2012. №47. pp. 188-201. doi: 10.1016/j.enpol.2012.04.057

309. Morgan Stanley Institute for Sustainable Investing. Sustainable Signals: New data from individual investors. 2018. URL: [https://www.morganstanley.com/pub/content/dam/msdotcom/ideas/sustainable-signals/pdf/Sustainable\\_Signals\\_Whitepaper.pdf](https://www.morganstanley.com/pub/content/dam/msdotcom/ideas/sustainable-signals/pdf/Sustainable_Signals_Whitepaper.pdf) (дата обращения: 2019.10.09)

310. Motlagh N. H., Mohammadrezaei M., Hunt J., Zakeri B. Internet of Things (IoT) and the Energy Sector / N. H. Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, B. Zakeri // *Energies*. 2020. Vol. 13, iss. 494. doi:10.3390/en13020494

311. Nadimi R., Tokimatsu K. Energy use analysis in the presence of quality of life, poverty, health, and carbon dioxide emissions // *Energy*. 2018. Vol. 153. pp. 671-684. doi: 10.1016/j.energy.2018.03.150

312. Nadimi R., Tokimatsu K. Modeling of quality of life in terms of energy and electricity consumption // *Applied Energy*. 2018. Vol. 212. pp. 1282-1294. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.006

313. Neil Adger W. Vulnerability // *Global Environmental Change*. 2006. Vol. 16. pp. 268-281. doi: :10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006

314. O'Brien G., Hope, A. Localism and energy: negotiating approaches to embedding resilience in energy systems // *Energy Policy*. 2010. Vol. 38, iss. 12. pp. 7550-7558. doi: 10.1016/j.enpol.2010.03.033
315. O'Brien G. Vulnerability and resilience in the European energy system // *Energy&Environment*. 2009. Vol. 20, iss. 3. pp. 399-410. doi: 10.1260/095830509788066457
316. Oil and governance: State-owned enterprises and the world energy supply / edited by D. G. Victor, D. R. Hults, M. Thurber. – New York: Cambridge University Press, 2012. 1014 p.
317. Pasten C., Santamarina J. C. Energy and quality of life // *Energy Policy*. 2012. Vol. 49. pp. 468-476. doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.051
318. Perrings C. Resilience in the dynamics of economy-environment systems // *Environmental and Resource Economics*. 1998. Vol. 11(3-4). pp. 503-520.
319. Projected costs of generating electricity. 2015 Edition. – Paris: International Energy Agency, Nuclear Energy Agency, 2015. 215 p. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>
320. Riahi K., Jewell J., Cherp A. Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices // *Energy policy*. 2014. Vol. 65. pp. 743-760. doi: 10.1016/j.enpol.2013.10.051
321. Reliability – guidelines to understanding reliability prediction. European Power Supply Manufacturers Association, 2005. 29 p. URL: [http://www.epsma.org/MTBF%20Report\\_24%20June%202005.pdf](http://www.epsma.org/MTBF%20Report_24%20June%202005.pdf)
322. Rochas C., Kuznecova T., Romagnoli F. The concept of the system resilience within the infrastructure dimension: application to a Latvian case // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 88. pp. 358-368. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.081>
323. Roege P. E., Collier Z. A., Mancillas J., McDonagh J. A., Linkov I. Metrics for energy resilience // *Energy Policy*. 2014. Vol. 72. pp. 249-256. doi: 10.1016/j.enpol.2014.04.012

324. Sadeghi M., Shavvalpour S. Energy risk management and value at risk modeling // *Energy policy*. 2006. №34. pp. 3367-3373.
325. Sadorsky P. Modeling renewable energy company risk // *Energy policy*. 2012. №40. pp. 39-40.
326. Scheepers M. EU standards for energy security of supply / M. Scheepers, A. Seebregts, J. de Jong, H. Maters – The Netherlands: Energy research Centre of the Netherlands, Clingendael international energy programme, 2007. 71 p.
327. Simmiea J., Martin R. The economic resilience of regions: towards an evolutionary approach. *Cambridge Journal of Regions // Economy and Society*. 2010. Vol. 3. pp. 27-43. doi: 10.1093/cjres/rsp029
328. Skea J., Chaudry M., Wang X. The role of gas infrastructure in promoting UK energy security // *Energy Policy*. 2012. Vol. 43. pp. 202-213. doi: 10.1016/j.enpol.2011.12.057
329. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. pp. 1654-1677, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.028>
330. Sioshansi F. P. *Energy, sustainability and the environment: technology, incentives, behavior.* – New York: Elsevier, 2011. 640 p.
331. Smil V. *Energy transitions: history, requirements, prospects.* – Westport: Praeger, 2010. 178 p.
332. Sovacool B. K., Mukherjee I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach // *Energy*. 2011. Vol. 36, iss. 8. pp. 5343-5355. doi: 10.1016/j.energy.2011.06.043
333. Sovacool B. K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions // *Energy Research & Social Science*. 2016. Vol. 13. pp. 202-215. doi: 10.1016/j.erss.2015.12.020
334. Sovacool B. K. The methodological challenges of creating a comprehensive energy security index // *Energy Policy*. 2012. Vol. 48. pp. 835-840. doi: 10.1016/j.enpol.2012.02.017



335. Sovacool B. K. Linking Energy Independence to Energy Security // I A E Energy Forum. 2013. Vol. 3. pp. 17-21.
336. Tabak J. Coal and oil. – New York: Facts on File, 2009. 208 p.
337. Taleb N. N. The black swan: The impact of the highly improbable. – New York: Random House Trade Paperbacks, 2010. 444 p.
338. Tertzakian P., Hollihan K. The end of energy obesity. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 296 p.
339. The energy reader / edited by L. Nader. – London: WILEY-BLACKWELL, 2010. 548 p.
340. The New energy paradigm / edited by D. Helm. – New York: Oxford University Press, 2007. 518 p.
341. The routledge handbook of energy security / edited by B.K. Sovacool. – New York: Routledge, 2011. 446 p.
342. Thomas S., Kerner D. Defense energy resilience: Lessons from Ecology. – Carlisle: Army War College, Strategic Studies Institute, 2010. 44 p.
343. Tierney K. Resilience and the Neoliberal Project: Discourses, Critiques, Practices and Katrina // American Behavioral Scientist. 2015. Vol. 59, iss. 10. pp. 1327-1342.
344. Tiwari Sh., Schelly Ch., Ou G., Sahraei-Ardakani M., Chen J., Jafarishiadeh F. Conceptualizing resilience: An energy services approach // Energy Research & Social Science. 2022. Vol. 94. 102878.
345. Tongsopit S., Kittner N., Chang Y., Aksornkij A., Wangjiraniran W. Energy security in ASEAN: a quantitative approach for sustainable energy policy // Energy policy. 2016. Vol. 90. pp. 60-72. doi: 10.1016/j.enpol.2015.11.019
346. Turton H., Barreto L. Long-term security of energy supply and climate change // Energy Policy. 2006. Vol. 34, iss. 15. pp. 2232-2250. doi: 10.1016/j.enpol.2005.03.016
347. Valuation of energy security for the United States. – Washington: Department of Energy, 2017. P. 288.

348. Vassilyev S. N. Intelligent control systems / S. N. Vassilyev, A. Yu. Kelina, Y. I. Kudinov, F. F. Pashchenko // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 103. pp. 623-628. doi: 10.1016/j.procs.2017.01.088

349. Vesnic-Alujevic L., Breitegger M., Pereira A. G. What smart grids tell about innovation narratives in the European Union: Hopes, imaginaries and policy // *Energy Research & Social Science*. 2016. Vol. 12. pp. 16-26, doi: 10.1016/j.erss.2015.11.011

350. Vugrin E. D. A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems / E. D. Vugrin, D. E. Warren, A. E. Mark, R. C. Camphouse // *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems*. 2010. pp. 77-116. doi: 10.1007/978-3-642-11405-2\_3

351. Walker B. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems / B. Walker, C. S. Holling, S. R. Carpenter, A. Kinzig // *Ecology and Society*. 2004. Vol. 9(5).

352. Watson J. Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity, oil, and gas sectors in the United States / J. Watson, R. Guttromson, C. Silva-Monroy, R. Jeffers, K. Jones, J. Ellison, C. Rath, J. Gearhart, D. Jones, T. Corbet, C. Hanley, L. T. Walker. – California: Sandia National Laboratories, 2014. 104 p.

353. World Commission on Environment and Development: Our Common Future. – London: Oxford University Press, 1987. 383 p.

354. Wiig S., Fahlbruch B. Exploring resilience: A scientific journey from practice to theory. Cham: Springer Open, 2019. 128 p.

355. Willis H. H., Loa K. Measuring the resilience of energy distribution systems. – Santa Monica: the RAND Corporation, 2015. 38 p.

356. Winzer Ch. Conceptualizing energy security // *Energy policy*. 2012. №46. pp. 36-48.

357. World energy trilemma index: Monitoring the sustainability of national energy systems. – London: The World Energy Council, 2018. – 158 p.

358. Wright P. Liberalisation and the security of gas supply in the UK // Energy policy. 2005. Vol. 33, iss. 17. pp. 2272-2290.

359. Xu Y., Du J., Wang Y. How to improve sustainability for industrial sectors: Optimizing production scales based on performance-oriented resource reallocation // Energy Economics. 2023. Vol. 119. 106525

360. Yergin D. The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power. – New York: Simon & Schuster, 1991. 908 p.

361. Zhou W. A retrospective analysis with bibliometric of energy security in 2000-2017 / W. Zhou, A. Kou, J. Chen, B. Ding // Energy Reports. 2018. Vol. 4. pp. 724-732. doi: 10.1016/j.egy.2018.10.012

362. Zou C. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era / C. Zou, Q. Zhao, G. Zhang, B. Xiong // Natural Gas Industry B. 2016. Vol. 3, iss. 1. pp. 1-11. doi: 10.1016/j.ngib.2016.02.001

363. Zweifel P., Bonomo S. Energy security: Coping with multiple supply risks // Energy economics. 1995. Vol. 17, iss. 3. pp. 179-183. doi: 10.1016/0140-9883(95)00018-P

APPENDIXES

**Appendix 1. Changes in Russia’s position in the global energy market from 1991 to 2021**

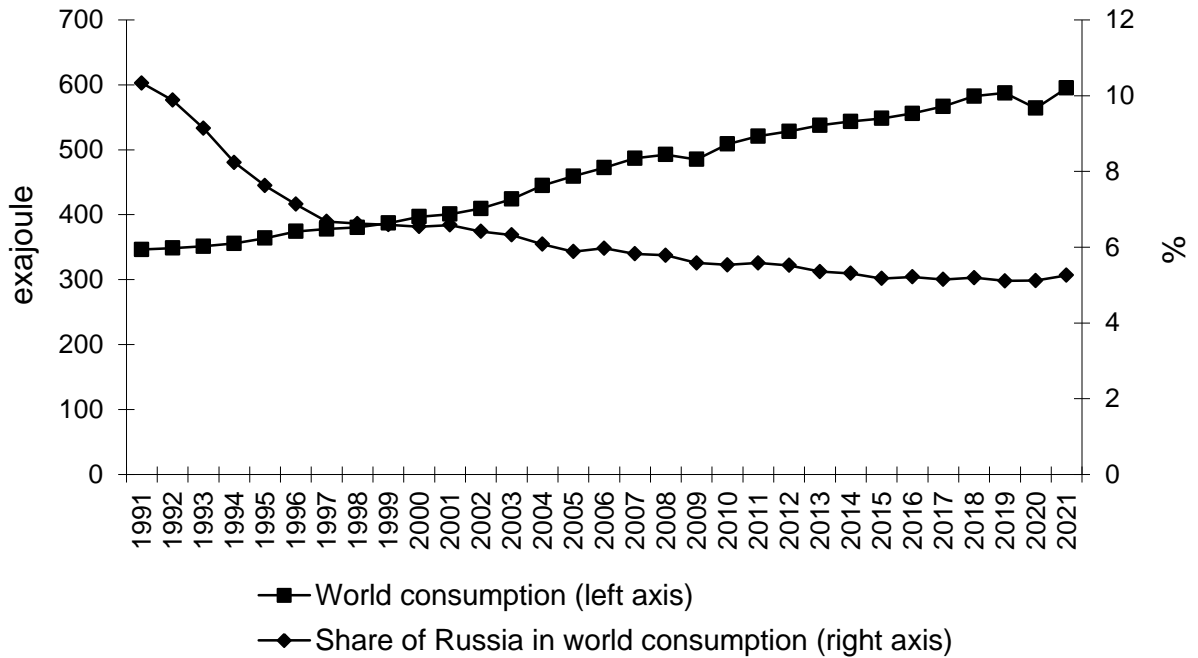


Figure 1 – Dynamics of world consumption of primary energy resources  
 Source: Compiled by the author based on BP data

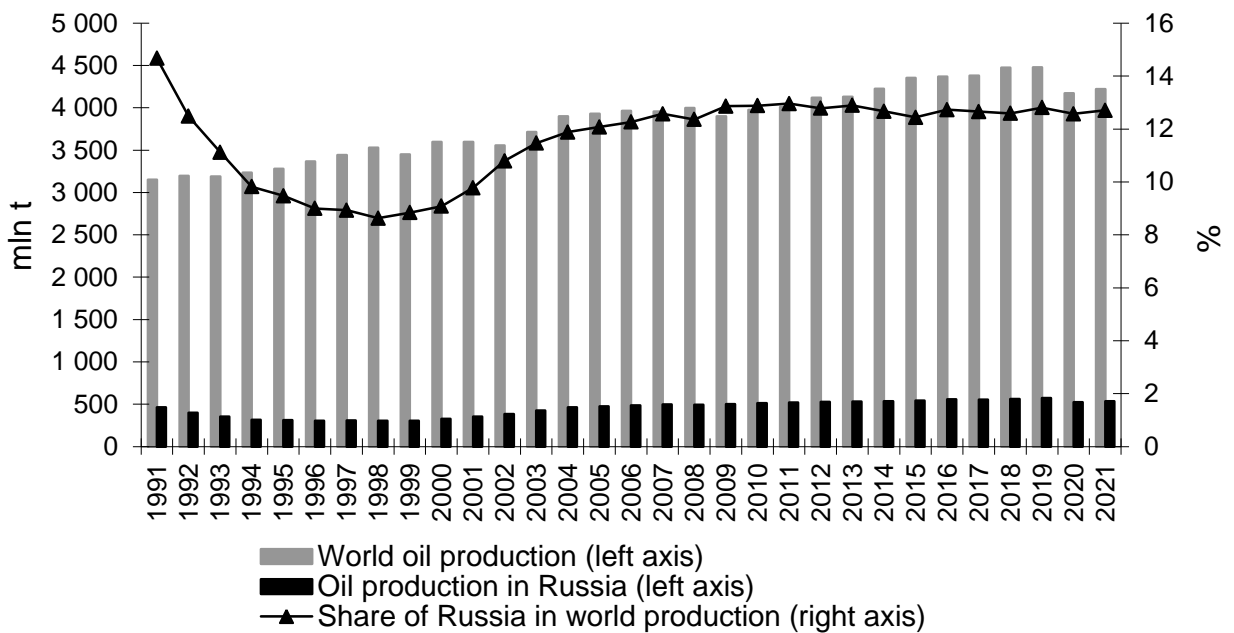


Figure 2 – Volumes of oil production in the world and in Russia  
 Source: Compiled by the author based on BP data

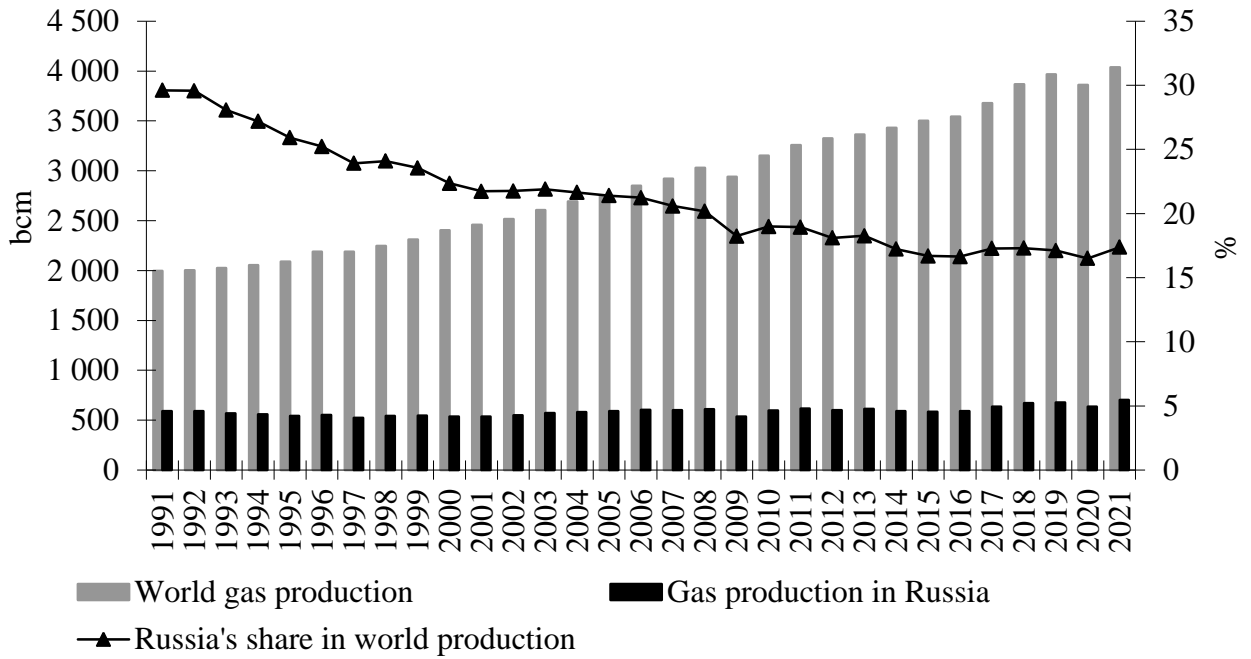


Figure 3 – Gas production volumes in the world and in Russia

Source: Compiled by the author based on BP data

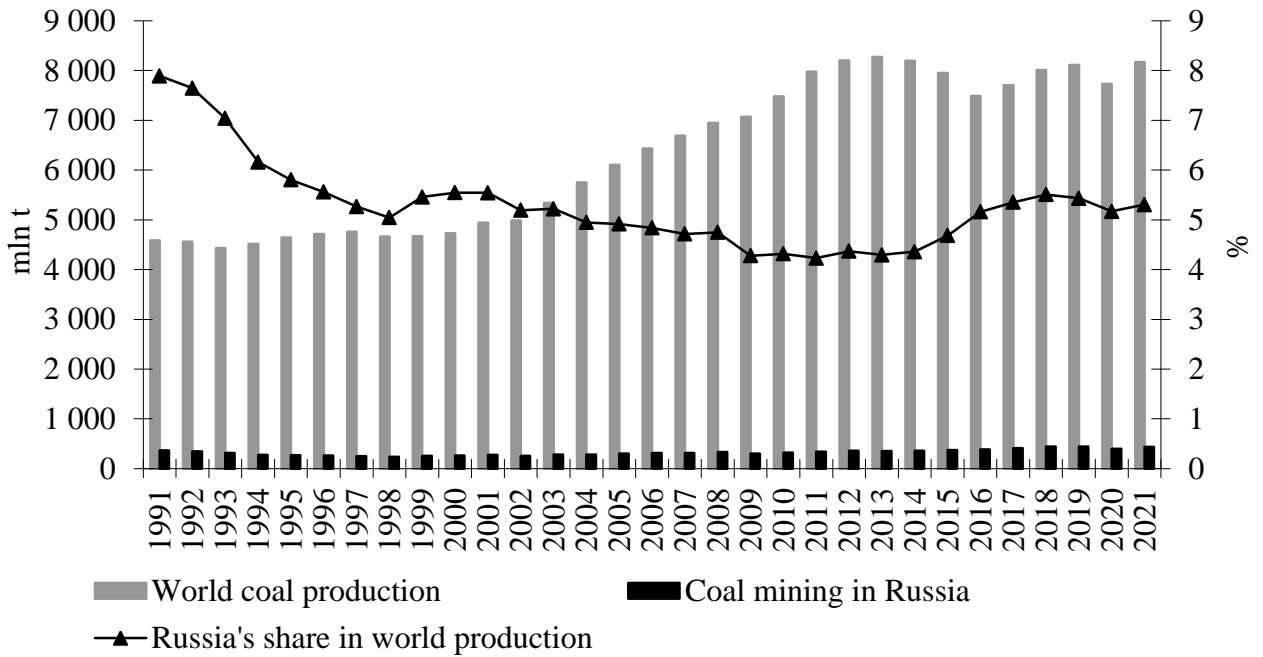


Figure 4 – Volumes of coal production in the world and in Russia

Source: Compiled by the author based on BP data

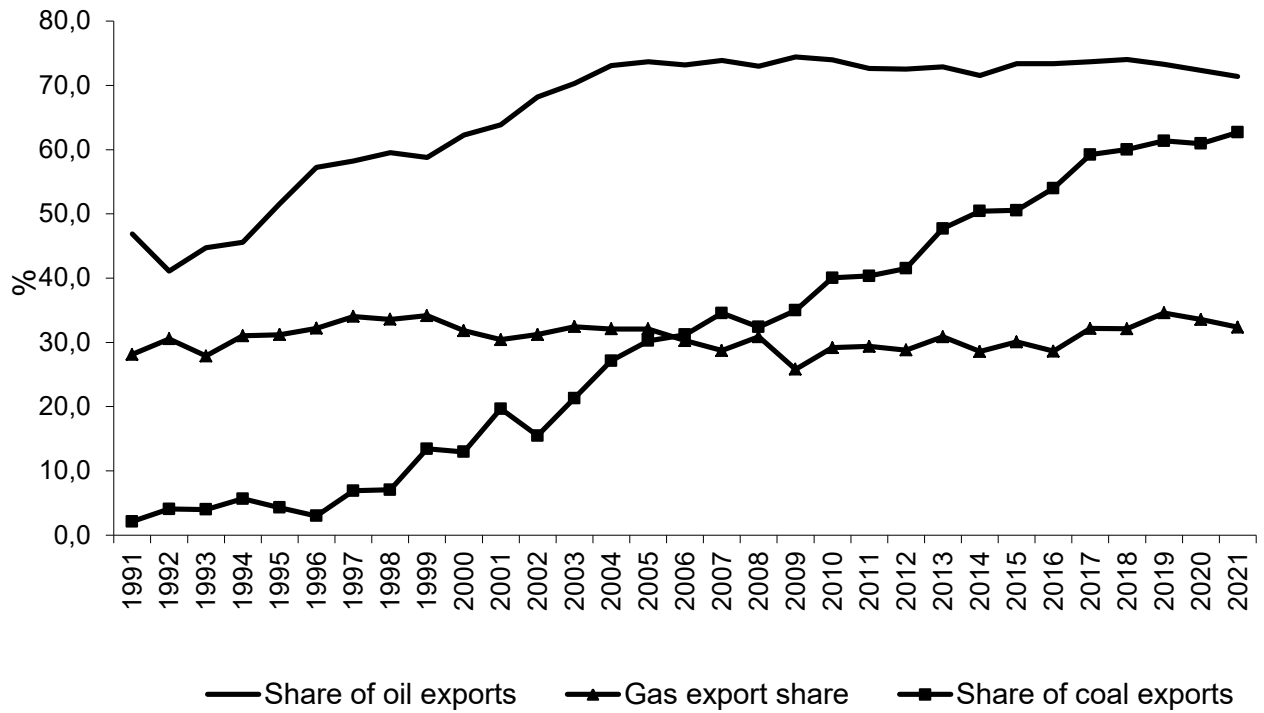


Figure 5 – Dynamics of the share of exports in the structure of hydrocarbon production in Russia

Source: Compiled by the author based on BP data.

**Appendix 2. Formal description of the developed by Ph.D. Yu. D. Kononov  
of the MIDL model used in assessing the macroeconomic consequences of the  
deficit of investments in the electric power industry**

The MIDL model (Macroeconomic Simulation Dynamic with Distributed Lags) is designed to assess the impact of changes in the country's fuel and energy complex on the development of the economy. The fuel and energy complex in MIDL is represented by the electric power industry (separately the production of electricity and district heat), the gas industry (including main gas pipelines), coal and oil production, and oil refining. The sectors of the economy under consideration include: mechanical engineering (with separation of investment and consumer), ferrous and non-ferrous metallurgy, chemical industry, timber industry, building materials industry, light and food industries, construction, transport, communications, trade, services and other industries.

MIDL is built on the principles of intersectoral balance. It describes the production relationships between the indicated sectors, between the production and non-production sectors of the economy in terms of the consumption of goods and services, investment and export-import relations.

The model maximizes the final consumption of goods and services for the period under consideration, taking into account the specified conditions and restrictions

$$\max \sum \sum Y_i(t) \delta_i(t) \quad (1)$$

where  $Y_i(t)$  – final consumption of product  $i$  for non-production needs in the year  $t$ ;  $\delta_i(t)$  – discount factor.

The main equations of the model are the balances of production and consumption of products of the industries under consideration, expressed in value form:

$$X_i(t) = \sum a_{ij}(t) X_j(t) + U_i(t) + Y_i(t) + \mathcal{E}K_i(t) - \mathcal{I}M_i(t) + \overline{\Delta \mathcal{Z}}_i(t) \quad (2)$$

where  $X_i(t)$  – gross output in industry  $i$ ;  $\mathcal{E}K_i(t)$  and  $\mathcal{I}M_i(t)$  – export and import of the  $i$ -th product;  $\overline{\Delta \mathcal{Z}}_i(t)$  – change in stocks or specified additional demand for products of the  $i$ -th industry;  $a_{ij}(t)$  – time-varying coefficients of production costs  $i$

for the production of products  $j$ ;  $U_i(t)$  – costs of products of capital-forming industries for the commissioning of new production facilities.

$$U_i(t) = \sum c_{ij}(\tau) \sum Z_j(\tau) \lambda_j(\tau - t) + \overline{U}_i(t) \quad (3)$$

where  $c_{ij}(\tau)$  – specific material costs for the construction of production facilities commissioned per year  $\tau$ ;  $Z_j(\tau)$  – new or reconstructed production facilities commissioned per year  $\tau$ ;  $\lambda_j(\tau)$  – distribution of investment resources by years of construction;  $\overline{U}_i(t)$  – specified costs of products of capital-forming industries for housing construction.

$$Z_i(t) = X_i(t + 1) - [1 - \beta_i(t)] X_i(t) \quad (4)$$

where  $\beta_i(t)$  – decommissioning of capacities in industry  $i$  in year  $t$ .

Equation (3) is related to the equation of restrictions on investment resources in individual industries or in the production sector as a whole:

$$K(t) = \sum U_i(t) \leq K(t - 1) \overline{I}_k(t) \quad (5)$$

where  $K(t)$  – amount of investment in fixed assets;  $\overline{I}_k(t)$  – given index of maximum investment growth.

The limitation on labor resources is also taken into account.:

$$L(t) = \sum l_i(t) X_i(t) \leq \overline{L}(t) \quad (6)$$

where  $l_i(t)$  – labor intensity of products  $i$  in a year  $t$ ;  $\overline{L}(t)$  – set (as a whole for the production sector or for individual industries) the maximum possible number of employees.

Expected changes (trends) in the structure of final consumption of goods and services are taken into account by setting bilateral restrictions on consumption growth:

$$Y_i(t - 1) \underline{IY}_i(t) \leq Y_i(t) \leq Y_i(t - 1) \overline{IY}_i(t) \quad (7)$$

where  $\overline{IY}_i(t)$  and  $\underline{IY}_i(t)$  – minimum and maximum consumption growth indices.

The same two-sided constraints are imposed on the behavior of the trajectories  $X_i(t)$ . These limitations, reflecting current and projected trends, to some extent smooth out the “switching” effect inherent in linear models.



Additional restrictions are imposed on production volumes, which take into account that the production capacities available in the year  $t$  cannot be loaded at 100% due to repairs, modernization and other factors:

$$X_i(t) \leq (X_i(t-1) + Z_i(t)) \rho_i(t) \quad (8)$$

where  $\rho_i(t)$  – capacity utilization factor.

The export of goods and services is limited in the model from below, while imports are limited from above:

$$\mathcal{E}K_i(t) \geq \underline{\mathcal{E}K}_i(t) \quad (9)$$

$$IM_i(t) \leq \overline{IM}_i(t) \quad (10)$$

In this case, a condition for the balance of exports and imports can be set. For example, imports of products of industry  $i$  in year  $t$  should not exceed its exports by the amount  $\gamma_i(t)$ :

$$IM_i(t) \leq \gamma_i(t) \mathcal{E}K_i(t) \quad (11)$$