

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Кузнецова Николая Владимировича

**«Аналитико-численные методы исследования скрытых
колебаний»,**

представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ.

Теория нелинейных колебаний динамических систем была создана в первой половине прошлого века. При этом структура большинства изучаемых систем была такой, что сам факт существования колебаний был очевиден, поэтому основные усилия исследователей были сосредоточены на анализе свойств и формы таких колебаний. В семидесятых годах прошлого века стало понятно, что динамические системы могут обладать странными аттракторами, имеющими сложную топологическую структуру. В последующие десятилетия усилия ученых были сосредоточены на исследовании структуры странных аттракторов, их размерности, условий их возникновения и локализации в фазовом пространстве. Открытие новых хаотических аттракторов стало возможным, благодаря стремительному развитию вычисленной техники и численных методов. При этом сам поиск аттракторов в фазовом пространстве для классических аттракторов Лоренца, Энона, Рёсслера, Чуа, Чена и других оказался достаточно простой задачей, так как области притяжения этих аттракторов содержат сколь угодно малые окрестности неустойчивых состояний равновесия исследуемой системы. Такие аттракторы являются самовозбуждающимися в том смысле, что вычислительная процедура с начальными данными из любой точки неустойчивого многообразия в окрестности состояния равновесия притягивается к аттрактору и визуализирует его.

Однако самовозбуждающиеся аттракторы не исчерпывают все типы возможных аттракторов. Существование аттракторов другого типа, не содержащих в своей области притяжения состояний равновесия – вложенных устойчивых циклов, хорошо известно для случая двухмерных систем. Такие аттракторы в диссертационной работе называются скрытыми аттракторами. Известными примерами скрытых аттракторов в системах автоматического управления являются построенные и представленные в работе контрпримеры к гипотезам Айзермана и

Калмана, в которых единственное устойчивое в малом состояние равновесия многомерной системы сосуществует с устойчивым периодическим решением.

Проблемы обнаружения и локализации скрытых аттракторов оказываются чрезвычайно важными при моделировании сложных инженерных и физических моделей. Наличие скрытых аттракторов может привести к тому, что наряду с желаемым устойчивым режимом работы в системе под действием возмущений могут возникнуть другие нежелательные устойчивые и неустойчивые режимы, способные привести к авариям. В диссертационной работе приведены примеры локализации скрытых колебаний в системах управления летательными аппаратами, в электромеханических моделях буровых установок и в системах фазовой синхронизации.

Публикации автора диссертационной работы по скрытым аттракторам вызвали волну интереса к исследованию многомерных динамических систем, которые либо не имеют состояний равновесия, либо имеют устойчивые в малом состояния равновесия и имеют аттрактор, который является скрытым. Более сотни работ по упомянутой тематике опубликовано исследователями из Китая, Вьетнама, Ирана, Турции, Греции, Италии, Испании, Польши, Чехии, Великобритании, США. В 2016 году в Тульском государственном университете была защищена кандидатская диссертация по специальности 05.13.18, в которой получили развитие предложенные в диссертационной работе Н.В. Кузнецова идеи поиска скрытых колебаний для анализа и синтеза скрытых аттракторов многомерных систем автоматического управления (Нгуен Нгок Хиен, Аналитико-численные методы исследования аттракторов многомерных систем управления, научный руководитель И.М. Буркин).

Первая глава диссертационной работы посвящена классификации самовозбуждающихся и скрытых аттракторов, развитию методов их поиска. Разработаны аналитические методы синтеза скрытых аттракторов в двумерных системах и многомерных системах с одной скалярной нелинейностью. Их эффективность продемонстрирована на примере анализа двумерных полиномиальных систем в 16-ой проблеме Гильберта и при построении контрпримеров к гипотезе Калмана. Для динамических систем общего вида предложена аналитико-численная процедура поиска скрытых аттракторов, основанная на анализе или синтезе сценария рождения скрытого аттрактора при изменении параметра системы. Приведены примеры визуализации скрытых периодических и хаотических аттракторов в различных инженерных и физических системах. Приведена реализация в пакете MATLAB алгоритма локализации скрытого колебания для модели динамики ракеты-носителя.

Вторая глава диссертации посвящена развитию методов анализа размерности динамических систем, позволяющих аналитически вычислять ляпуновскую размерность глобальных аттракторов без их непосредственной локализации в фазовом пространстве, что особенно важно при изучении скрытых аттракторов.

Показана эквивалентность функций ляпуновского типа, используемых в методе Г.А. Леонова для аналитической оценки ляпуновской размерности, некоторым специальным гладким заменам переменных, получено обобщение метода Г.А.Леонова на динамические системы с дискретным временем. Наибольшее впечатление производит факт получения точных формул ляпуновской размерности глобальных аттракторов для ряда известных систем. Предложена программная реализация вычисления ляпуновской размерности в пакете MATLAB, основанная на SVD декомпозиции фундаментальной матрицы решений, и показано ее применение для вычисления ляпуновской размерности системы Энона.

Заключительная глава диссертации посвящена построению математических моделей систем фазовой синхронизации, анализу их устойчивости и поиску скрытых колебаний. Применение метода усреднения Крылова-Боголюбова позволило провести вычисление характеристик фазовых детекторов для различных видов периодических сигналов в терминах их коэффициентов Фурье, необходимое для построения математических моделей в пространстве фаз сигналов и доказательства эквивалентности моделей в пространстве сигналов и фаз сигналов. Для моделей в пространстве фаз сигналов предложены строгие математические определения основных инженерных характеристик работы систем фазовой синхронизации – диапазонов допустимых отклонений частот, которые соответствуют локальной устойчивости (hold-in range – полоса удержания), глобальной устойчивости (pull-in range – полоса захвата), и глобальной устойчивости с областью без проскальзывания циклов (lock-in range – полоса захвата без проскальзывания циклов). В том числе в работе решена задача известного американского инженера Ф.Гарднера об однозначном определении полосы захвата без проскальзывания циклов, поставленная в 1979 году во втором издании его монографии, и предложен численный алгоритм ее определения. В качестве примеров работы алгоритма проведено вычисление полосы захвата без проскальзывания для классической системы фазовой синхронизации с различными типами фильтров. В ряде случаев показано качественное отличие характеристик для моделей, полученных в работе, и упрощенных классических инженерных моделей. Аналитически показано несовпадение полосы удержания для классической инженерной математической модели схемы Костаса, где отброшены боковые фильтры, и полной математической модели с тремя фильтрами. Для двухфазной схемы фазовой автоподстройки, математические модели которой в пространстве фаз и в пространстве сигналов не содержат остаточных колебаний с удвоенной частотой, в работе показаны трудности численного определения полосы захвата при наличии в модели скрытых колебаний. В частности, наглядно продемонстрированы потенциальные ошибки, которые могут быть допущены при моделировании системы ФАП в широко используемом инженерном пакете SIMetrix. На основе полученных результатов получены патенты на изобретения и полезные модели и свидетельства на программы для ЭВМ.

Работа выполнена на высоком математическом уровне, содержит новые важные научные результаты, которые представляют несомненный вклад в теорию и имеют практическое значение. Основные результаты диссертации в полной степени опубликованы в российских и международных научных журналах, индексируемых Scopus. Результаты диссертационной работы были представлены на пленарных докладах российских и международных конференций. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание.

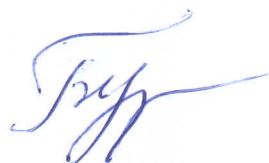
Замечания по диссертации

- В сноске 7 на странице 89 указывается на монотонное убывание значений локальной ляпуновской размерности на специальной последовательности точек, имеющей предельное значение. В работе ничего не сказано о значении локальной ляпуновской размерности в предельной точке (аналог утверждения о достижении максимума локальной ляпуновской размерности в работах Константина, Идена, Фоиша и Темама – см. обсуждение на стр. 92).
- В формуле 3.26 на странице 111 для состояний равновесия в математической модели фазовой автоподстройки в первой строчке после первого знака равенства и во второй строчке после второго знака равенства пропущен знак “-”. Однако эта неточность не повлияла на дальнейшие рассуждения (например, соотношения для состояний равновесия в формулах 3.31 на странице 116 и 3.37 на странице 118).
- В определении полосы удержания на странице 120 требуется наличие непрерывного изменения одного из устойчивых состояний равновесия для всех отклонений частоты этой полосы. Для того чтобы полоса удержания содержала в себе полосу захвата (см. страницу 128), вообще говоря, аналогичное требование необходимо добавить в Замечание 6 на странице 122.
- При адекватном описании физической модели условие ограниченности состояния фильтра в математической модели (Замечание 7, стр. 123) должно естественно вытекать из динамики математической модели. Соответствующие рассуждения в работе не приводятся.
- В работе имеется ряд опечаток: ссылка на несуществующий рисунок 3.25 на стр. 30, некорректные ссылки на работы [10,11] на стр.145 и работу [3] на стр.146, дублирующийся текст на стр. 77 и другие погрешности редакционного характера.

Указанные замечания носят частный характер и не умаляют достоинств представленной работы.

Ввиду вышесказанного считаю, что диссертация Н.В. Кузнецова удовлетворяет всем требованиям действующего Положения «О присуждении учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор заслуживает присуждения искомой степени по специальности: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент
доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой математического анализа
Тульского государственного университета
Буркин Игорь Михайлович,
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92,
(4872) 25-46-21, 41-44,
i-burkin@yandex.ru

 / И.М.Буркин/

21.11.2016 г.

