

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

ЗЮЗИН Денис Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СПИНА В  
НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА

05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

05.13.01 — системный анализ, управление и обработка информации  
(по прикладной математике и процессам управления)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет».

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор  
**Сеничев Юрий Валерьевич**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Андреанов Сергей Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Флегонтов Александр Владимирович**,  
заведующий кафедрой информационных систем и программного обеспечения Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена

кандидат физико-математических наук  
**Артамонов Станислав Александрович**,  
старший научный сотрудник Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований  
(Лаборатория физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина),  
г. Дубна, Московская область

Защита состоится **25 февраля 2015 г. в 15 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.232.50 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., д. 35, ауд. 327.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах просьба присылать по адресу: 198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., д. 35, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.232.50 Г. И. Курбатовой.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9.

Автореферат и диссертация размещены на сайте [www.spbu.ru](http://www.spbu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» декабря 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Г. И. Курбатова

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) элементарных частиц является предметом многочисленных экспериментальных исследований. Это связано с тем, что Стандартная модель (СМ) физики элементарных частиц предсказывает крайне малые величины ЭДМ, например ЭДМ нейтрона  $|d_n| \sim 10^{-32} \div 10^{-31} e \cdot \text{см}$ , ЭДМ электрона  $|d_e| \sim 10^{-40} e \cdot \text{см}$ , ЭДМ мюона  $|d_\mu| < 10^{-38} e \cdot \text{см}$ , что лежит вне пределов достижимой на настоящий момент экспериментальной точности. В то же время, разработанные физические теории за пределами Стандартной модели (так называемые теории «Новой физики») предсказывают величины ЭДМ на порядки большие, чем предсказания СМ. Обнаружение ЭДМ элементарных частиц послужит подтверждением теорий Новой физики и, в конечном счете, даст ключ к разгадке тайны образования Вселенной. В настоящее время проводится множество экспериментов по измерению ЭДМ элементарных частиц, например эксперименты по измерению ЭДМ на ультрахолодных нейтронах, проводимые в ILL<sup>1</sup>, FRM-II<sup>2</sup>, ПИЯФ<sup>3</sup>; эксперименты по измерению ЭДМ электрона в ICL<sup>4</sup>, используя молекулы YbF, в Гарварде, используя молекулы ThO, и другие. В различных лабораториях планируются эксперименты по измерению ЭДМ других элементарных частиц.

Несмотря на прикладываемые усилия, ЭДМ ни одной элементарной частицы до сих пор не был обнаружен, хотя точность проводимых экспериментов значительно улучшилась. На настоящее время верхние пределы ЭДМ для различных частиц измерены со следующей точностью: для электрона  $|d_e| < 10^{-29} e \cdot \text{см}$ , для нейтрона  $|d_n| < 2.9 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ , для мюона  $|d_\mu| < 1.8 \cdot 10^{-19} e \cdot \text{см}$ , для протона  $|d_p| < 5.4 \cdot 10^{-24} e \cdot \text{см}$ . Сложность измерения столь малых величин заключается в том числе и в необходимости накопления достаточного количества статистических данных, чтобы обеспечить приемлемый уровень достоверности. В 2004 году для измерения

<sup>1</sup>ILL — Institute Laue-Langevin — Институт Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция

<sup>2</sup>FRM-II — Forschungsreaktor München II — Исследовательский реактор в Мюнхене, Германия

<sup>3</sup>ПИЯФ — Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, Гатчина, Россия

<sup>4</sup>ICL — Imperial College London — Имперский колледж Лондона, Великобритания

ЭДМ протона предложен метод, получивший название метода «замороженного спина». Он основан на том факте, что спин частицы с определенной («магической») энергией в накопительном кольце, состоящем только из электростатических элементов, изменяет свое значение («поворачивается») только за счет ЭДМ, взаимодействующего с электрическим полем. Для измерения ЭДМ протона предложено сконструировать электростатическое кольцо с радиусом  $\sim 40$  м и электрическим полем  $\sim 10$  МВ/м между пластинами, разделенными на  $\sim 3$  см. В кольцо инжектируется пучок с горизонтальной поляризацией, а при длительном удержании пучка протонов в кольце появляется вертикальная поляризация из-за ЭДМ, которую можно измерить при помощи высокоточного поляриметра. В этом эксперименте планируется достигнуть точности в измерении ЭДМ протона на уровне  $10^{-29} e \cdot \text{см}$ , что значительно превосходит точность предыдущих экспериментов. Для измерения ЭДМ с указанной точностью в накопительном кольце требуется обеспечить сохранение поляризации пучка в течение длительного времени (порядка тысячи секунд, что соответствует  $\sim 10^9$  оборотов пучка в ускорителе).

Преимуществом использования накопительного кольца для измерения ЭДМ является тот факт, что в кольце одновременно находится большое количество частиц, таким образом происходит быстрое накопление статистических данных. В качестве предварительного эксперимента по обнаружению ЭДМ в ИКР<sup>5</sup> предложено провести эксперимент на базе ускорительного комплекса COSY<sup>6</sup>. Для измерения ЭДМ в кольце COSY в ускоритель инжектируется пучок частиц с вертикальной поляризацией, а за счет встроенного в кольцо элемента, создающего горизонтальное электрическое ВЧ-поле, происходит резонансная раскачка горизонтальной поляризации пучка, которая измеряется поляриметром.

Разработка ускорителя подразумевает изучение динамики пучка перед этапом технического проектирования. Таким образом, исследование

---

<sup>5</sup>ИКР — Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich — Институт ядерной физики исследовательского центра г. Юлих, Германия

<sup>6</sup>COSY — Cooler Synchrotron — Охлаждающий синхротрон

динамики спин-орбитального движения является актуальной задачей физики пучков.

**Целью диссертационной работы** является разработка проблемно-ориентированной системы управления динамикой частиц в циклическом ускорителе, предназначенного для измерения электрического дипольного момента элементарных частиц. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) провести системный анализ, моделирование и оптимизацию управляющего поля пучком частиц с учетом поляризационных эффектов с целью построения эффективной математической модели ускорителя;
- 2) разработать структуру программных модулей, реализующих математическую модель и выполнить программную реализацию соответствующей проблемно-ориентированной системы;
- 3) провести серию численных экспериментов с целью оптимизации разработанной модели, для чего разработать программное обеспечение, реализующее предложенные модели, методы, алгоритмы, и методику;
- 4) разработать алгоритмическое обеспечение поддержки принятия решений в процессе процесса моделирования, основанное на предоставлении адекватной графической информации;
- 5) исследовать особенности влияния управляющих параметров ускорителя с целью оптимизации длительной эволюции пучка частиц (за времена порядка тысячи секунд — более  $10^9$  оборотов) с учетом поляризационных эффектов;
- 6) исследовать эффекты декогеренции спина в электростатическом кольце.

**Методами исследования** являются методы математического и компьютерного моделирования и численного эксперимента.

**Научная новизна.** Впервые исследован метод поиска ЭДМ протона с использованием электростатического накопительного кольца, а также метод резонансного измерения ЭДМ в магнитном кольце. Исследованы

эффекты декогеренции спина частиц из-за влияния различных факторов. Разработан комплекс программ, предназначенный для численного моделирования спин-орбитальной динамики пучков и анализа полученных данных. Все представленные в диссертационной работе результаты и положения являются новыми.

**Практическая ценность работы.** Разработанный комплекс программ используется при изучении поведения пучков в ускорителях заряженных частиц в Институте ядерной физики ИКР. Результаты, представленные в диссертационной работе, используются при выполнении НИР по тематике диссертационной работы на факультете прикладной математики – процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечиваются корректным применением методов математического моделирования. Комплекс программ, разработанный в рамках диссертационного исследования, прошел отладку на тестовых задачах.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинаре по поиску электрического дипольного момента элементарных частиц (Бад Хоннеф, Германия, 2011), II международной конференций по ускорителям частиц IPAC2011 (Сан-Себастьян, Испания), VII семинаре по методам Тейлора (Ки-Уэст, Флорида, США, 2011), III международной конференция по ускорителям частиц IPAC2012 (Новый Орлеан, Луизиана, США), 11 международной конференции по вычислительной физике ICAP12 (Росток, Германия), семинаре по поиску электрического дипольного момента при помощи накопительных колец (Тренто, Италия, 2012), IV международной конференции по ускорителям частиц IPAC2013 (Шанхай, Китай), а также на 1–3 семинарах коллаборации JEDI (Юлих, Германия, 2013–2014), V международной конференции по ускорителям частиц IPAC2014 (Дрезден, Германия).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 126 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка литературы, включаю-

щего 124 наименования. Работа содержит 29 рисунков и 2 приложения на 12 листах.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 13 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

### Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, а также сформулирована ее цель и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

В **Первой главе** предлагается математическая модель для теоретического описания метода «замороженного спина» для измерения ЭДМ протона в накопительных кольцах, а также показана необходимость сохранения горизонтальной поляризации, рассмотрены факторы, приводящие к декогеренции спина.

Уравнение движения спина  $\mathbf{S}$  в электромагнитных полях  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  описывается уравнением Томаса–Баргмана–Мишеля–Телегди (Т–БМТ). В подвижной системе координат, связанной с равновесной частицей, это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{S},$$

$$\boldsymbol{\Omega} = -\frac{e}{m} \left\{ G\mathbf{B} + \left( \frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \boldsymbol{\beta} \times \frac{\mathbf{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left( \frac{\mathbf{E}}{c} + \frac{\boldsymbol{\beta}}{c} \times \mathbf{B} \right) \right\}, \quad (1)$$

где  $G = (g - 2)/2$  — аномальный магнитный момент частицы,  $g$  — гиромагнитное соотношение,  $e$  — элементарный заряд,  $c$  — скорость света,  $m$  — масса частицы,  $\gamma$  — Лоренц-фактор,  $\boldsymbol{\beta}$  — скорость частицы относительно скорости света,  $\eta$  — безразмерный коэффициент, задаваемый соотношением  $d = \eta e\hbar/4mc$ ,  $d$  — ЭДМ и  $\Omega$  — частота прецессии спина относительно импульса равновесной частицы. Энергию протона, соответствующую фактору Лоренца  $\gamma_{\text{mag}}$ , удовлетворяющую соотношению  $\gamma_{\text{mag}}^2 = 1/G_p + 1 \approx 1,558$ , где  $G_p$  — аномальный магнитный момент протона, будем называть «магической» энергией. Из уравнения (1) следует, что в электростатическом ускорителе, в котором  $\mathbf{B} = 0$ , спин протона с

«магической» энергией совершает осцилляции с частотой

$$\Omega = -\frac{e}{m} \cdot \frac{\eta}{2} \cdot \frac{\mathbf{E}}{c}. \quad (2)$$

В ускорителе с электрической напряженностью 10,5 МВ/м при величине ЭДМ  $d = 10^{-29}e \cdot \text{см}$  частота прецессии спина составляет в численном выражении 3,2 рад/с =  $3,2 \cdot 10^{-9}$  рад/с. При инжекции пучка с горизонтальной поляризацией  $S_z = 1$  за время 1000 секунд из-за ЭДМ возникает вертикальная компонента спина  $S_y \sim 10^{-6}$ , которую способен измерить современный поляриметр.

В выражении для частоты спина (2) предполагается отсутствие у частиц в пучке разброса по энергии:  $\gamma = \gamma_{\text{mag}}$ . В реальном пучке это не так, а спин осциллирует не только в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной, причем частота горизонтальных осцилляций зависит от нескольких факторов, и эта частота для разных частиц различна. Вследствие этого происходит деполяризация пучка в горизонтальной плоскости. Из уравнения (1) следует, что вертикальная спиновая компонента  $S_y$  в пучке, потерявшем горизонтальную поляризацию, не нарастает. Следовательно, время сохранения горизонтальной поляризации является фактором, ограничивающим чувствительность предложенного эксперимента. Промежуток времени, за который среднее квадратичное отклонение горизонтальных проекций спина  $S_x$  в пучке достигает 1 рад, будем называть *временем декогеренции спина* (SCT — spin coherence time).

Известно, что некогерентность спиновой частоты в горизонтальной плоскости может быть оценена с помощью простой формулы

$$\nu_{sz} = -2 \frac{e \overline{E}_x L_{\text{cir}}}{m_0 c^2 \gamma} G \frac{\Delta p}{p},$$

где  $\overline{E}_x$  — усредненное значение продольного электрического поля в ускорителе,  $L_{\text{cir}}$  — длина орбиты. При разбросе начального импульса в пучке  $\Delta p/p = 5 \cdot 10^{-5}$  ( $\Delta K/K_0 = 10^{-4}$ , где  $K_0$  — кинетическая энергия равновесной частицы,  $\Delta K$  — отклонение энергии частицы от энергии равновесной частицы), время декогеренции спина меньше одной миллисекунды,

что составляет несколько тысяч оборотов. В кольце с ВЧ-резонатором с продольным полем  $E_s = E_{\text{rf}} \cos(\nu_z \varphi)$ , где за  $\nu_z$  обозначена частота обращения равновесной частицы, возникают синхротронные колебания, т. е.  $\Delta p/p = (\Delta p/p)_m \cdot \cos(\nu_z \varphi)$ , где  $(\Delta p/p)_m$  — среднее значение отклонения импульса, тем самым в линейном приближении  $\nu_{sz}$  оказывается равным нулю.

Однако, в работе показано, что при рассмотрении уравнений вращения спина в нелинейном приближении в выражении для  $\nu_{sz}$  возникает квадратичный член  $(\Delta p/p)^2$ :

$$\nu_{sz} = \frac{e\bar{E}_x L_{\text{cir}}}{m_0 c^2 \gamma} \left[ -2G \left( \frac{\Delta p}{p} \right)_m \cos \nu_z \varphi + 3G \left( \frac{\Delta p}{p} \right)_m^2 \cos^2 \nu_z \varphi \right].$$

Таким образом, частицы с разными уровнями энергии осциллируют в горизонтальной плоскости с различными частотами и происходит деполяризация.

Кроме разброса частиц по импульсу  $\Delta p/p$  на декогеренцию влияет начальное отклонение частицы от равновесной частицы в фазовых плоскостях  $x-p_x$  и  $y-p_y$ . Частицы с ненулевым отклонением от оси имеют новый уровень равновесного импульса  $\delta p/p$ , что приводит к увеличению уровня аббераций спина. Уменьшая частоты бетатронных колебаний в кольце и вводя таким образом дополнительные колебания уровня равновесного импульса, можно увеличить время декогеренции спина.

В работе предложено представление отклонения спиновой частоты от спиновой частоты «магической» частицы с помощью конечных разностей до второго порядка:

$$\delta \nu_{sz} = \frac{e}{m_0 c^2 \gamma} \delta \left( \frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) L_{\text{orb}} E_x \left[ 1 + \frac{\delta L_{\text{orb}}}{L_{\text{orb}}} + \frac{\delta E_x}{E_x} + \gamma \delta \left( \frac{1}{\gamma} \right) \right], \quad (3)$$

т. е. частота прецессии спина зависит от удлинения орбиты  $\delta L_{\text{orb}}/L_{\text{orb}}$ , электрического поля  $\delta E_x/E_x$  и отклонения по энергии  $\delta(1/\gamma)$ . В этой формуле за  $L_{\text{orb}}$  обозначена длина орбиты частицы. Изменяя мультипольные компоненты поля  $E_x$  можно изменять спиновую частоту частиц. Изме-

ние конфигурации поля  $E_x$  производится при помощи изменения формы отклоняющих дефлекторов либо применением в кольце секступолей.

Также в первой главе рассматривается метод измерения ЭДМ, основанный на измерении изменения поляризации в результате взаимодействия ЭДМ с горизонтальным электрическим ВЧ-полем в магнитном кольце. В кольцо инжектируется вертикально поляризованный пучок протонов или дейтронов, а за счет взаимодействия ЭДМ с электрическим ВЧ полем возникает горизонтальная компонента спина  $S_z$ . Идея метода предложена в 2006 году Ю.Ф.Орловым, У.Морзе (W.Morse) и Я.Семерсидисом (Ya.Semertzidis) и в настоящее время рассматривается в качестве предварительного эксперимента по измерению ЭДМ в ускорителе COSY.

Рассматривается идеальное магнитное кольцо с ведущим полем  $B_y$  и переменным электрическим полем, создаваемым дефлектором длиной  $l_{\text{rf}}$  с частотой  $f_{\text{rf}}$  и фазой  $\psi$ :  $E(t) = E_{\text{rf}} \cdot \cos(2\pi f_{\text{rf}} \cdot t + \psi)$ . Обозначив за  $\nu_s = \gamma G$ , а за  $\nu_{\text{rf}}$  соотношение  $f_{\text{rf}}/f_{\text{rev}}$ , где  $f_{\text{rev}}$  — частота обращения, можно переписать уравнение (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dS_x}{d\tau} &= -[\nu_s + \alpha \cos \Psi(\tau)] S_z, \\ \frac{dS_y}{d\tau} &= -[\nu_e - h \cos \Psi(\tau)] S_z, \\ \frac{dS_y}{d\tau} &= [\nu_e - h \cos \Psi(\tau)] S_y + [\nu_s + \alpha \cos \Psi(\tau)] S_x, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \tau &= 2\pi t f_{\text{rev}}, \\ \alpha &= \left( \frac{1}{\gamma^2 - 1} - G \right) \gamma \beta_z \cdot \frac{E_{\text{rf}} l_{\text{rf}}}{c B_y L_{\text{cir}}}, \\ h &= \frac{\eta}{2} \gamma \cdot \frac{E_{\text{rf}} l_{\text{rf}}}{c B_y L_{\text{cir}}}, \\ \nu_e &= \frac{\eta}{2} \gamma \beta_z, \\ \Psi(\tau) &= (\nu_{\text{rf}} \pm n)\tau + \psi. \end{aligned}$$

Существует два резонансных условия, при которых возрастает  $S_y$  компонента спина частицы:  $\nu_{\text{rf}} \pm n = 2\nu_s$  и  $\nu_{\text{rf}} \pm n = \nu_s$ .

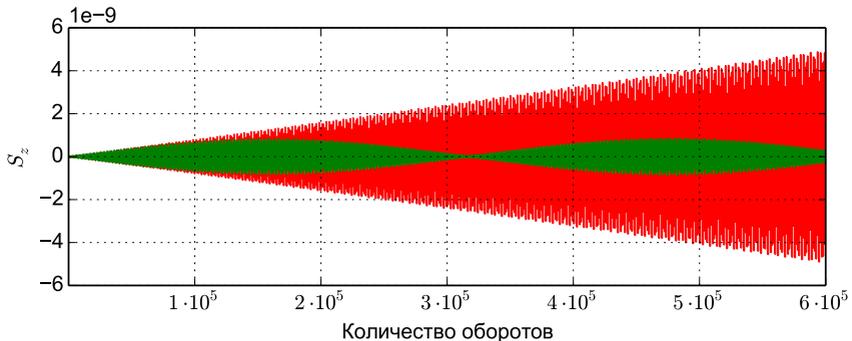


Рис. 1. Осцилляции горизонтальной компоненты спина  $S_y$  в резонансном (изображено красным) и нерезонансном (изображено зеленым) случаях

Для изучения поведения спина в нерезонансных условиях вводится относительная расстройка частоты  $\delta$ :  $\nu_{\text{rf}} = \nu_s(1 \pm \delta)$ . В диссертационной работе решается система уравнений (4) методом Рунге-Кутты 4 порядка и таким образом изучается поведение спина протонов с энергией 100 МэВ в резонансном и нерезонансном случаях. На рис. 1 представлены решения уравнения (4) для частиц с ЭДМ  $d = 10^{-24}e \cdot \text{см}$  в случае резонанса и в случае, когда условия резонанса нарушены и  $\delta = 10^{-5}$ . Как видно из рисунка, горизонтальная проекция спина совершает быстрые осцилляции с периодом  $T_f$ , при этом амплитуда горизонтальных спиновых осцилляций начинает возрастать, но в нерезонансном случае после достижения  $a_{\text{max}}$  амплитуда осцилляций начинает уменьшаться и через период  $T_e$  достигает нуля. Для резонансного увеличения компоненты  $S_z$  протона с ЭДМ  $d_p = 10^{-29}e \cdot \text{см}$  и при использовании поляриметра с точностью  $S_z > 10^{-3}$  необходимо стабилизировать расстройку частоты на уровне  $\delta \approx 10^{-15}$ .

Для возбуждения резонанса также можно использовать ВЧ-фильтр Вина — устройство, создающее горизонтальное электрическое и вертикальное магнитное ВЧ-поля.

**Вторая глава** содержит подробное описание известного метода численного моделирования спин-орбитальной движения пучка заряженных частиц в электромагнитных полях, основанного на дифференциальной алгебре, используемый в диссертационной работе для исследования длительной эволюции пучка в накопительном кольце. Рассмотрены методы

численного моделирования, предложенные М. Берцем (M. Berz, Университет штата Мичиган, США), лежащие в основе пакета COSY Infinity, т.к. эти методы отличаются от традиционных методов решения систем дифференциальных уравнений.

В главе также приводятся необходимые сведения о дифференциальной алгебре, рассматриваются основные операции, и показано, как происходит дифференцирование при помощи алгебраических операций. Приводятся канонические уравнения движения заряженных частиц в управляющих полях, понятие оператора эволюции динамических систем и его применение для численного моделирования спин-орбитального движения. В силу гамильтоновости исходной системы уравнений показано, что для моделирования длительной эволюции пучка необходимо, чтобы укороченное матричное отображение обладало свойством симплектичности.

**В Третьей главе** приводится описание разработанного в рамках диссертационного исследования комплекса программ для моделирования динамики пучков. Методы дифференциальной алгебры, представленные в Главе 2, позволяют производить расчеты циклических ускорителей с большой вычислительной эффективностью и они используются в программе COSY Infinity, которая разработана в Университете штата Мичиган (MSU — Michigan State University). Опыт использования COSY Infinity в ИКР показал корректность результатов, полученных с использованием программы. Также следует отметить, что модуль динамики пучков `cosy.fox` при расчете движения не учитывает влияние ЭДМ частицы на движение спина. Для расчетов задач, возникающих при проектировании ускорителя для измерения ЭДМ, были разработаны процедуры для модуля `cosy.fox`, позволяющие учитывать влияние ЭДМ на спин соответственно уравнениям (1).

Также был разработан комплекс программ RSX, предоставляющий графический интерфейс к COSY Infinity, построенный на идеологии виртуального ускорителя. Разработанный комплекс позволяет автоматизировать расчеты, возникающие при изучении ускорителей заряженных частиц, позволяет пользователю эффективно использовать возможности вычислительного ядра, выполнять задачи в параллельном режиме, обраба-

тивать и хранить в базе данных результаты исследований. Пользователь взаимодействует с программным комплексом при помощи веб-браузера через графический веб-интерфейс. Численные эксперименты могут проводиться параллельно на нескольких вычислительных ресурсах.

Все выполненные задачи сохраняются для последующей обработки и предоставляются по запросу пользователя. Если виртуальный эксперимент был проведен ранее, то при необходимости результаты эксперимента будут извлечены из базы данных, без проведения повторного численного моделирования. После проведения моделирования данные могут быть обработаны и проанализированы, а также представлены пользователю в графической форме.

**Четвертая глава** содержит результаты численного моделирования динамики пучка в электростатическом ускорителе, проведены численные эксперименты по исследованию метода переменных дефлекторов для увеличения времени декогеренции спина. Из формулы (3) следует, что коэффициенты разложения поля  $\delta E_x/E$  влияют на спиновую частоту.

$$\frac{\delta E_x}{E_x} = -k_1 \frac{x}{R} + k_2 \left(\frac{x}{R}\right)^2 + \dots$$

Изменение коэффициентов разложения поля  $k_1, k_2, \dots, k_n$  возможно при помощи изменения формы дефлекторов или при помощи введения дополнительных секstupолей в кольцо. Проведенное моделирование показало, что спин очень чувствителен к изменению коэффициентов. Выбирая значение секstupольных компонент в дефлекторах можно увеличить SCT до нескольких тысяч секунд, но значение коэффициентов должно быть подобрано очень точно.

На рис. 2 изображены графики изменения  $S_x$  для частиц с  $\Delta K/K_0 = \pm 10^{-4}$  и начальным отклонением от оси  $x = 3$  мм в структуре с оптимальными дефлекторами. Из рис. 2 следует, что за  $5 \cdot 10^5$  оборотов спин частиц при  $\Delta K/K = \pm 10^{-4}$  достигнет величины  $S_x = -10^{-4}$  рад, т. е. за  $10^9$  оборотов горизонтальная компонента спина увеличится до  $S_x \approx 0,2$  рад. Таким образом, SCT всего пучка составляет  $\sim 5000$  секунд. При помощи секstupолей в накопительном кольце таким же образом можно влиять на поведение спина.

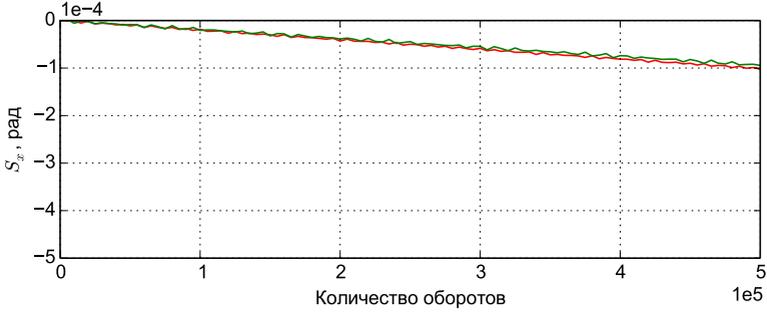


Рис. 2. Движение спина частиц с начальным смещением  $x = 3$  мм,  $\Delta K/K_0 = 10^{-4}$  (красным) и  $\Delta K/K_0 = -10^{-4}$  (зеленым) в накопительном кольце с дефлекторами  $k_1 = 0,94$ ,  $k_2 = -0,961$ ,  $k_3 = 1,0$ ,  $k_4 = -1,0$ ,  $k_5 = 1,0$

При использовании дефлекторов со специально подобранными компонентами в разложении поля, изменяющимися при переходе от одного дефлектора к другому (alternating spin gradient), время декогеренции спина может достигать нескольких тысяч секунд.

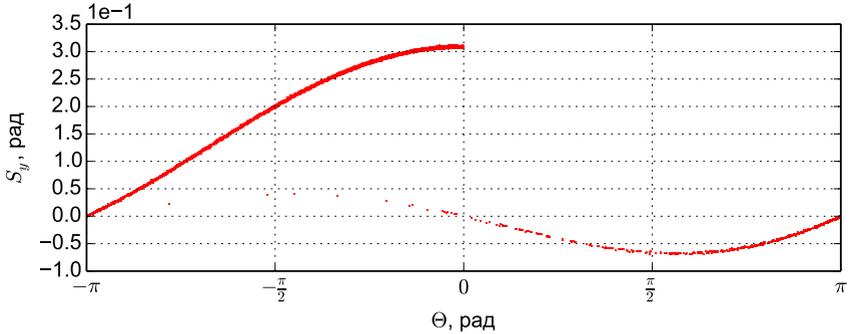


Рис. 3. Распределение спина в пучке после  $10^8$  оборотов

Также четвертая глава содержит результаты моделирования движения пучка на высокопроизводительном вычислительном кластере с учетом влияния ЭДМ. На рис. 3 изображено распределение спина в пучке через  $10^8$  оборотов в электростатическом ускорителе при ЭДМ  $d_p = 10^{-23} e \cdot \text{см}$ . В качестве начального пучка были случайным образом выбраны 40960 частиц с нормальным распределением со средними квадратичными отклонениями начальных координат от равновесной частицы  $\sigma_x = \sigma_y = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\sigma_{\Delta K/K_0} = 10^{-4}$ ,  $\sigma_{s_x} = \sigma_{s_y} = 10^{-3}$ . За  $\Theta$  обозначен

угол между проекцией спина на горизонтальную плоскость и импульсом,  $\text{tg } \Theta = S_x/S_z$ . Для равновесной частицы  $\Theta = 0$ . Пока для частицы  $-\pi/2 < \Theta < \pi/2$ , то  $S_y$  возрастает за счет взаимодействия ЭДМ с электрическим полем. На рисунке видно, что чем больше значение угла  $\Theta$  имеет спин частицы, тем меньше накопленная вертикальная компонента спина  $S_y$ .

В **Заключении** по результатам исследования сделаны краткие выводы и предложены основные направления развития работы.

В **Приложении А** приведен синтаксис языка для задания структуры ускорителя в программном комплексе RSX. В **Приложении В** приведено описание графического интерфейса RSX.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- 1) математическая модель спин-орбитального движения в накопительном кольце для поиска электрического дипольного момента протона и результаты численного моделирования при больших временах удержания пучка;
- 2) специальный программный комплекс, предназначенный для повышения эффективности, надежности и качества моделирования динамики спина, и допускающий распараллеливание вычислительных процессов;
- 3) методы и инструменты поддержки принятия решения, основанные на предоставлении адекватной графической информации с учетом структурно-параметрического представления управляющих параметров ускорителя;
- 4) результаты исследования системных связей и закономерностей функционирования управляющих систем ускорителя на основные характеристики пучка частиц с использованием инструментов обработки информации.

### **Список публикаций по теме диссертации**

#### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ**

1. *Зюзин Д. В.* Программный комплекс для моделирования спин-орбитального движения в накопительных кольцах // *Ядерная физика и инжиниринг*, вып. 5, 2014. — С. 416–428.
2. *Зюзин Д. В., Сеничев Ю. В., Андрианов С. Н., Иванов А. Н.* Моделирование динамики протонов в электростатических накопительных кольцах // *Вестн. С.-Петербург. ун-та Сер. 10: Прикладная математика, информатика, процессы управления*, вып. 1, 2014. — С. 51–62.

### Публикации в других изданиях

3. *D. Zyuzin* A New Tool for Automated Orbit and Spin Motion Analysis // Proc. of the 5th Int. Part. Acc. Conf., IPAC'14, Дрезден, Германия. — С. 403–405.
4. *Yu. Senichev, A. Ivanov, A. Lehrach, R. Maier, D. Zyuzin, S. Andrianov* Spin Tune Decoherence in Multipole Fields // Proc. of the 5th Int. Part. Acc. Conf., IPAC'14, Дрезден, Германия. — С. 3017–3019.
5. *Yu. Senichev, A. Ivanov, A. Lehrach, R. Maier, D. Zyuzin, S. Andrianov* Spin Tune Parametric Resonance Investigation // Proc. of the 5th Int. Part. Acc. Conf., IPAC'14, Дрезден, Германия. — С. 3020–3022.
6. *D. Zyuzin, S. Andrianov, N. Kulabukhova* Data Management and Analysis for Beam Dynamics Simulation // Proc. of the 4th Int. Part. Acc. Conf., IPAC'13, Shanghai, China. — С. 927–929.
7. *A. Ivanov, S. Andrianov, N. Kulabukhova, R. Maier, Yu. Senichev, D. Zyuzin* Testing of Symplectic Integrator of Spin-Orbit Motion Based on Matrix Formalism // Proc. of the 4th Int. Part. Acc. Conf., IPAC'13, Shanghai, China. — С. 2582–2584.
8. *Yu. Senichev, R. Maier, D. Zyuzin, N. Kulabukhova* Spin Tune Decoherence Effects in Electro- and Magnetostatic Structures // Proc. of the 4th Int. Part. Acc. Conf., IPAC'13, Shanghai, China. — С. 2579–2581.
9. *Yu. Senichev, A. Lehrach, R. Maier, D. Zyuzin, M. Berz, K. Makino, S. Andrianov, A. Ivanov* Storage Ring EDM Simulation: Methods and Results // Proc. of the 11th Int. Computational Acc. Phys. Conf., ICAP2012, Rostock, Germany. — С. 99–103.
10. *D. Zyuzin, R. Maier, Yu. Senichev, M. Berz, S. Andrianov, A. Ivanov* Comparison of Different Numerical Modelling Methods for Beam Dynamics in Electrostatic Rings // Proc. of the 3rd Int. Part. Acc. Conf., IPAC'12, New Orleans, Louisiana, USA. — С. 1335–1337.
11. *Yu. Senichev, R. Maier, D. Zyuzin, M. Berz* Alternating Spin Aberration Electrostatic Lattice for EDM Ring // Proc. of the 3rd Int. Part. Acc. Conf., IPAC'12, New Orleans, Louisiana, USA. — С. 1332–1334.
12. *D. Zyuzin, R. Maier, Yu. Senichev* High Order Non-linear Motion in Electrostatic Rings // Proc. of the 2nd Int. Part. Acc. Conf., IPAC'11, San Sebastian, Spain. — С. 2172–2174.
13. *Yu. Senichev, R. Maier, D. Zyuzin* The Spin Aberration of Polarized Beam in Electrostatic Rings // Proc. of the 2nd Int. Part. Acc. Conf., IPAC'11, San Sebastian, Spain. — С. 2175–2177.