

На правах рукописи

СМАЛЮК Виктор Васильевич

**ПОДАВЛЕНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПУЧКА
В ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ
НАКОПИТЕЛЯХ**

**01.04.20 – физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

ЛЕВИЧЕВ — доктор физико-математических наук,
Евгений Борисович Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ВИНОКУРОВ — доктор физико-математических наук,
Николай Александрович профессор, Учреждение Российской
академии наук Институт ядерной
физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск.

КОРЧУГАНОВ — доктор физико-математических наук,
Владимир Николаевич Российский научный центр
"Курчатовский институт", г. Москва.

ПЕРЕЛЬШТЕЙН — доктор физико-математических наук,
Элкуно Аврумович профессор, Объединенный институт
ядерных исследований, г. Дубна
Московской обл.

ВЕДУЩАЯ — Государственный научный центр
ОРГАНИЗАЦИЯ: Российской Федерации "Институт
физики высоких энергий", г. Протвино
Московской обл.

Защита диссертации состоится "_____" _____ 2010 г.
в "_____" часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90, проспект Академика Лаврентьева,
11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан «____» _____ 2010 г.

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

А. А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ускорители заряженных частиц являются основным инструментом физики высоких энергий — науки о фундаментальных свойствах материи. Кроме того, в мире работает и строится большое число источников синхротронного излучения — специализированных электронных накопителей и лазеров на свободных электронах. Ускорители заряженных частиц применяются также в промышленности и в медицинских целях.

Интенсивный пучок частиц, движущийся в вакуумной камере ускорителя, наводит электромагнитные поля (wake-поля), взаимодействие пучка с которыми приводит к различным коллективным эффектам, зависящим от количества частиц в пучке. Коллективные эффекты динамики пучка оказывают существенное влияние на эффективность работы ускорителей, наиболее значительным их следствием является неустойчивость движения пучка.

Предмет диссертационной работы составляют методы аналитического, численного и экспериментального изучения коллективных эффектов динамики пучка и импедансов связи с целью подавления неустойчивостей пучка в ускорителях.

Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертации обусловлена как устойчивым научным интересом к данной области исследований, так и практической значимостью применения результатов для создания новых и модернизации существующих ускорительных установок.

Знание импедансов связи необходимо для оценки условий устойчивости движения пучка в проектируемом или уже работающем ускорителе. В настоящее время обязательным условием проектирования вакуумной камеры ускорителя является минимизация импедансов, требующая как можно более точных и надежных расчетов. Импеданс ряда элементов вакуумной камеры может быть оценен с помощью аналитических формул, давая таким образом приближение первого порядка. Более точный расчет wake-полей и импедансов в структурах со сложной геометрией производится с помощью программ трехмерного моделирования wake-полей. Расчет и оптимизация wake-потенциалов и импедансов, а также

оценки влияния коллективных эффектов на движение пучка являются актуальными для проектируемых ускорителей.

Вычисление импедансов давно эксплуатируемых ускорителей, вакуумная камера которых имеет большое число неоднородностей, является весьма сложной и трудоемкой задачей. В таких случаях весьма актуальны экспериментальные исследования импедансов путем анализа движения пучка, для чего необходимы эффективные средства и методы диагностики колебаний пучка.

Прецизионное измерение параметров колебаний пучка важно в исследованиях не только коллективных эффектов, но и ряда других задач ускорительной физики, таких как нелинейная динамика пучка, эффекты встречи пучков в коллайдерах и др., таким образом актуальна задача точного определения параметров колебаний по измеренным данным, представляющим собой дискретную последовательность координат центра масс пучка.

При выполнении резонансных условий малые отклонения положения или энергии пучка могут усиливаться из-за его взаимодействия с wake-полями. Такая положительная обратная связь приводит к нарастанию амплитуды колебаний и, как следствие, к потере пучка или снижению его качества. Исследование механизмов возбуждения и подавления неустойчивостей является актуальным практически на любой ускорительной установке.

Общепринятым способом борьбы с неустойчивостью движения пучка является введение отрицательной обратной связи. Развитие цифровой техники позволяет создавать системы обратной связи, управляющие движением каждого сгустка в многосгустковом режиме. Оснащение ускорителя быстрыми системами обратной связи для пооборотного подавления поперечных и продольных неустойчивостей актуально в процессе модернизации установки и повышения ее эффективности.

Цель работы

Исследования коллективных эффектов, неустойчивостей пучка и импедансов связи занимают важное место как в процессе проектирования новых ускорительных установок, так и в процессе модернизации уже существующих, с целью повышения их эффективности.

Расчет и измерение импедансов связи необходимо для оценки условий устойчивости пучка в ускорителе и обеспечения его эффективной работы. Экспериментальные исследования неустойчивостей и импедансов путем анализа движения пучка требуют эффективных средств и методов диагностики.

Задача определения параметров колебаний путем анализа данных, поставляемых датчиками положения пучка, часто является нетривиальной из-за быстрого затухания или потери когерентности колебаний; для ее решения необходимы алгоритмы обработки данных, обеспечивающие точность, существенно превосходящую точность дискретного преобразования Фурье.

Неустойчивости являются одними из самых распространенных причин ухудшения качества пучка и ограничения его интенсивности. Изучение механизмов возникновения неустойчивостей пучка и разработка методов их подавления представляет несомненный научный и практический интерес.

Таким образом, основными целями диссертационной работы являются:

- разработка эффективных методов диагностики пучка для экспериментального изучения неустойчивостей и импедансов;
- расчет и оптимизация импедансов связи, а также оценки влияния коллективных эффектов на движение пучка в ускорителе;
- определение импедансов связи работающих ускорителей по результатам пучковых измерений;
- изучение механизмов возникновения и подавления неустойчивости движения пучка;
- подавление неустойчивостей с помощью систем обратной связи.

Научная новизна

Разработаны эффективные методы спектрального анализа колебаний пучка, впервые в России и одними из первых в мире примененные для рутинной диагностики пучка. Установлено, что любой алгоритм уточнения дискретного преобразования Фурье имеет принципиально неустраняемую погрешность вычисления частоты колебаний, представленных в виде дискретной последовательности выборок. Причина погрешности —

сдвиг максимума амплитудного спектра из-за интерференции боковых лепестков.

Предложен и реализован новый, более чувствительный метод измерения азимутального распределения импеданса связи, основанный на измерении искажения равновесной орбиты пучка локальным поперечным импедансом. Впервые в мире метод был успешно применен на комплексе ВЭПП-4 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) для измерения азимутального распределения импеданса циклического ускорителя, а также в лаборатории Sincrotrone Trieste (Италия) для измерения импеданса, вносимого скрепером с регулируемой апертурой, установленным на источнике СИ Elettra.

В результате экспериментов, проведенных на источнике СИ третьего поколения Elettra, впервые в мире показано, что поперечная многоструктурная неустойчивость пучка в накопителе электронов может быть эффективно подавлена с помощью расфазировки колебаний частиц пучка, вносимой как эффект второго порядка семейством гармонических секступолей, без использования октупольных линз. В результате исследований было определено установлено, что расфазировка вызывается разбросом частот колебаний частиц внутри сгустка, и может быть эффективной как в случае многоструктурной, так и одноструктурной поперечной неустойчивости.

Разработана многочастичная численная модель для анализа колебаний пучка с учетом ТМС-неустойчивости, хроматического head-tail-эффекта, а также потери когерентности колебаний за счет хроматизма и нелинейности. С использованием результатов численного моделирования на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М впервые в России получено более чем двукратное превышение порогового тока ТМС-неустойчивости без применения обратной связи, за счет хроматического и нелинейного механизмов подавления неустойчивости. Проведены исследования эффективности новой цифровой системы поперечной обратной связи ВЭПП-4М в режимах с различными значениями хроматизма и нелинейности магнитной структуры; удалось более чем в три раза превысить порог ТМС-неустойчивости пучка, инжектируемого в накопитель ВЭПП-4М

Проведены расчет и оптимизация импедансов вакуумной камеры секции вигглеров-затухателей, спроектированной и изготовленной в ИЯФ

СО РАН для источника СИ PETRA III (DESY, Германия). Вакуумная камера, имеющая сложное поперечное сечение из-за наличия приемников излучения для поглощения беспрецедентно большой мощности СИ, не имеет аналогов в мире. Измерения, проведенные в процессе запуска в эксплуатацию накопителя PETRA III, подтвердили расчетные оценки коллективных эффектов.

Практическая полезность

Научная и практическая полезность диссертационной работы заключается в разработке, совершенствовании и практическом применении методов исследования коллективных эффектов и импедансов связи с целью подавления неустойчивостей пучка.

Разработаны эффективные методы спектрального анализа колебаний пучка, востребованные в экспериментальных исследованиях как коллективных эффектов и неустойчивостей, так и других интересных аспектов динамики пучка.

Новый, более точный метод измерения локального импеданса связи, успешно опробованный на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М и на источнике СИ Elettra, может применяться для исследования импедансов циклических ускорителей.

С использованием математического моделирования механизмов возникновения и подавления неустойчивостей пучка удалось настроить режим ВЭПП-4М, позволяющий вдвое превысить пороговый ток ТМС-неустойчивости без применения обратной связи, путем настройки хроматизма и нелинейности магнитной структуры. В результате оптимизации системы обратной связи с учетом хроматических и нелинейных эффектов получено более чем трехкратное превышение порогового тока ТМС-неустойчивости

Расчет импедансов вакуумной камеры секции вигглеров-затухателей PETRA III, имеющей сложное поперечное сечение и вносящей существенный вклад в суммарный импеданс, позволил провести оптимизацию формы камеры. Последующие эксперименты показали, что, как и ожидалось, ухудшения качества пучка не произошло.

Проведено важное с практической точки зрения сравнительное исследование программ трехмерного моделирования wake-полей MAFIA и

GdfidL, широко используемых для расчета wake-потенциалов и импедансов элементов вакуумной камеры проектируемых ускорителей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методы спектрального анализа колебаний пучка, разработанные для экспериментального исследования коллективных эффектов, нелинейной динамики пучка и т. д.
2. Новый оригинальный метод измерения азимутального распределения импеданса связи, основанный на измерении искажения равновесной орбиты пучка локальным поперечным импедансом и обеспечивающий существенно лучшее разрешение по сравнению с ранее используемым методом, основанным на измерении набега бетатронной фазы.
3. Результаты исследований подавления поперечной многосгустковой неустойчивости пучка в накопителе электронов с помощью расфазировки колебаний частиц в сгустке, вносимой как эффект второго порядка семейством гармонических секступолей, без использования октупольных линз.
4. Многочастичная численная модель, разработанная для анализа устойчивости поперечных колебаний пучка с учетом ТМС-неустойчивости, хроматического head-tail-эффекта, а также потери когерентности колебаний за счет хроматизма и нелинейности.
5. Результаты исследований эффективности цифровой системы поперечной обратной связи ВЭПП-4М, позволившие достичь более чем трехкратного превышения порогового тока ТМС-неустойчивости.
6. Результаты расчета и оптимизации импедансов вакуумной камеры секций вигглеров-затухателей, спроектированных и изготовленных в ИЯФ СО РАН для источника СИ PETRA III.

Апробация работы

Работы, составляющие материал дис, докладывались и обсуждались на научных семинарах в отечественных и зарубежных научных центрах, таких как ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), Курчатовский институт (г. Москва), лаборатория DESY (Германия), лаборатория синхротронного излучения Elettra (Италия), лаборатория ALBA (Испания).

Доклады о работах по теме диссертации были представлены на следующих российских и международных конференциях: XIV Совецание по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 1994), European Particle Accelerator Conference EPAC-1996 (Барселона, 1996), European Particle Accelerator Conference EPAC-1998 (Стокгольм, 1998), European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators DIPAC-1999 (Честер, 1999), European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators DIPAC-2001 (Гренобль, 2001), Particle Accelerator Conference PAC-2001 (Чикаго, 2001), European Particle Accelerator Conference EPAC-2002 (Париж, 2002), XX Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2006 (Новосибирск, 2006), European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators DIPAC-2007 (Венеция, 2007).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 печатных работах, включая статьи в российских и зарубежных журналах [1–15] и в сборниках трудов всероссийских и международных конференций [16–28]. Часть материала диссертации изложена в книгах, изданных на русском [29] и английском [30] языках, а также вошла в учебное пособие [31] для студентов магистратуры Новосибирского государственного университета.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в исследованиях неустойчивостей пучка и разработке методов их подавления на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) [17,26,28] и накопителе электронов — источнике СИ Elettra (Sincrotrone Trieste, Италия) [2,22–24]. Проведены экспериментальные исследования импедансов связи электронных накопителей [3, 19, 25], разработан новый метод измерения азимутального распределения импедансов [4, 20], обеспечивающий существенно лучшую точность по сравнению с ранее используемыми. Разработаны эффективные алгоритмы спектрального анализа колебаний [5,21], которые впервые в России и одними из первых в мире были применены для рутинной диагностики и экспериментального изучения

динамики пучка [1, 10, 11, 14–16, 18]. Кроме того, автором была проведена работа по расчету и оптимизации импедансов вакуумной камеры секций вигглеров-затухателей, произведенных в ИЯФ СО РАН для источника СИ PETRA III (DESY, Германия) [8] и оценки импедансов и неустойчивостей для проекта источника СИ ALBA (Испания) [27].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав и заключения. Материал работы, изложенный на 172 страницах, включает 79 рисунков и список литературы, содержащий 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулирована направленность работы, дается краткий обзор истории изучения коллективных эффектов и неустойчивостей пучка в циклических ускорителях, описаны структура и содержание диссертации.

В **Главе 1** кратко описан математический аппарат, применяемый для анализа коллективных эффектов динамики пучка. Поскольку причиной коллективных эффектов является взаимодействие пучка с элементами вакуумной камеры, то для их анализа очевидно необходимо соответствующее описание как самого пучка, так и камеры. Определены понятия wake-потенциала, wake-функции и импеданса связи. Wake-функция — это функция отклика структуры на возбуждение точечным зарядом, она определяется только формой и электромагнитными свойствами структуры и не зависит от распределения зарядов в пучке. В случае пучка с произвольным распределением плотности взаимодействие с wake-полями определяется wake-потенциалом, представляющим собой свертку wake-функции с нормированной линейной плотностью пучка. В большинстве практических случаев для анализа устойчивости движения пучка достаточно рассмотреть только монополярную продольную W_{\parallel} и дипольную поперечную W_{\perp} wake-функции, соотношение между которыми задается теоремой Пановского-Венцеля.

В частотной области взаимодействие пучка с wake-полями удобно описывать, представляя компоненты вакуумной камеры в виде частотно-зависимых импедансов связи. Продольный Z_{\parallel} и поперечный Z_{\perp} импедансы являются Фурье-образами соответствующих wake-функций W_{\parallel} и W_{\perp} . Каждый компонент вакуумной камеры представляет собой импеданс, являющийся комплексной и чаще всего сложной функцией частоты (частотной характеристикой). При отсутствии интерференции wake-полей, возбуждаемых пучком в разных компонентах вакуумной камеры (удаленные друг от друга компоненты или быстрозатухающие wake-поля), импедансы аддитивны при любых частотах. В этом случае импеданс всей вакуумной камеры может быть представлен суммой импедансов ее составных частей.

Практически для любого участка вакуумной камеры импеданс может быть представлен в виде эквивалентной RLC-цепи для каждой моды колебаний. Высокодобротная (узкополосная) мода является более долгоживущей чем низкодобротная (широкополосная). Узкополосный импеданс приводит к взаимодействию нескольких сгустков между собой, в то время как широкополосный импеданс вносит взаимодействие частиц внутри сгустка. Таким образом, в принципе можно отдельно рассматривать узкополосный и широкополосный импедансы, в соответствии с видом связи между частицами пучка, вносимой тем или иным импедансом. Наличие в ускорителе участков с узкополосным импедансом (например, паразитные высшие моды ускоряющих резонаторов) может приводить к возникновению многосгустковой неустойчивости, а широкополосный импеданс может вызвать внутрисгустковую неустойчивость пучка.

Вакуумная камера ускорителя в целом обычно представляется в виде широкополосного импеданса, полученного суммированием широкополосных импедансов всех компонентов камеры. Широкополосный импеданс можно полагать аддитивным, поскольку wake-поля быстро затухают и интерференцией wake-полей, возбуждаемых пучком в разных компонентах вакуумной камеры, практически можно пренебречь. Величина суммарного широкополосного импеданса используется для оценок устойчивости внутрисгусткового движения пучка (а также является мерой качества проектирования и изготовления вакуумной камеры).

В лептонных накопителях взаимодействие пучка с продольным импедансом обычно приводит к удлинению сгустка. Если ток пучка превышает

ет некоторую пороговую величину, то возникает микроволновая неустойчивость продольного движения. Амплитуда продольных колебаний частиц пучка обычно ограничивается нелинейными эффектами, и микроволновая неустойчивость не приводит к потерям частиц, однако может ухудшить качество пучка, так как выше порога с ростом тока происходит увеличение размеров сгустка и энергетического разброса частиц в пучке.

Резонансное взаимодействие пучка и короткоживущих поперечных wake-полей, характеризуемое поперечным широкополосным импедансом, является причиной неустойчивости поперечных связанных мод (transverse coupling modes, ТМС или fast head-tail). Короткоживущие wake-поля, наведенные головной частью сгруппированного пучка, воздействуют на частицы его хвостовой части (head-tail-эффект). Из-за синхротронных колебаний голова и хвост пучка периодически меняются местами, при выполнении резонансных условий происходит неограниченное нарастание амплитуды бетатронных колебаний, приводящие к потерям частиц пучка. При ненулевом хроматизме магнитной структуры возникает head-tail-эффект, когда некоторые моды колебаний становятся неустойчивыми при любом токе пучка, без порога.

В ускоряющих высокочастотных резонаторах кроме основной моды, энергия которой передается пучку для ускорения и компенсации потерь энергии на излучение и когерентных потерь из-за взаимодействия пучка с резистивным импедансом, возбуждаются также паразитные высшие моды. Минимизация высших мод — необходимое условие проектирования современных резонаторов, однако полное подавление высших мод является практически невыполнимой задачей. Взаимодействие пучка с высшими модами ускоряющих резонаторов (узкополосный импеданс) приводит к возбуждению долгоживущих wake-полей, которые, воздействуя на следующие сгустки, могут вызвать продольную или поперечную неустойчивость в многосгустковом режиме. Кроме высших мод резонаторов поперечная многосгустковая неустойчивость может также возбуждаться при резонансном взаимодействии пучка с резистивным импедансом стенок вакуумной камеры.

Глава 2 посвящена анализу методов спектрального анализа, востребованных в экспериментальных исследованиях как коллективных эффектов и неустойчивостей, так и других интересных аспектов динамики пучка, таких как изучение нелинейной динамики, эффектов встречи

пучков в коллайдерах и др. Общепринятым методом вычисления частоты колебаний пучка является дискретное преобразование Фурье (ДПФ), примененное к последовательности выборок поперечной координаты, измеренных датчиком положения пучка на каждом обороте. Задача точного определения параметров колебаний по измеренным данным часто является нетривиальной из-за быстрого затухания или потери когерентности колебаний. В случае малого количества выборок точность ДПФ оказывается недостаточной для анализа движения пучка, особенно если частота и амплитуда колебаний зависят от времени. Дискретное преобразование Фурье имеет характерную погрешность определения частоты колебаний, не превышающую $\pm 1/N$, где N — число выборок, и не зависящие от N погрешности определения амплитуды и фазы. Очевидный способ улучшения точности путем увеличения N может оказаться непригодным, если исследуемые колебания быстро затухают. Кроме того, увеличение размера массива N приводит к квадратичному росту затраченного процессорного времени.

Для решения этой проблемы необходимы алгоритмы обработки данных, обеспечивающие точность, намного превосходящую ДПФ. Задача уточнения ДПФ в общем виде может быть сформулирована так: при заданном N необходимо найти частоту колебаний с точностью лучшей, чем $\pm 1/N$, в интервале $[\frac{m-1}{2N}, \frac{m+1}{2N}]$ где m — номер максимальной по амплитуде гармоники ДПФ. Улучшение точности определения частоты позволит также точнее определить амплитуду и фазу колебаний.

Простым методом уточнения ДПФ является интерполяция амплитудного спектра, однако точность интерполяции значительно ухудшается, если колебания быстро затухают или имеют сложную огибающую, так как в этих случаях амплитудный спектр отличается от спектра гармонической функции, используемой для интерполяции. Классический способ уточнения ДПФ — это увеличение длины массива путем дополнения нулями. Недостатком этого метода является увеличение объема вычислений. Для экономии компьютерных ресурсов и ускорения работы программ обработки данных разработан быстрый и надежный метод поиска максимума спектра между m -й и $m+1$ -й гармониками ДПФ — метод промежуточных гармоник. Дополнительно сократить объем вычислений позволяет применение алгоритма дихотомии.

Тем не менее, несмотря на возможность найти максимум амплитудного спектра с высокой точностью, задача уточнения ДПФ не может считаться полностью решенной, так как может оказаться, что положение этого максимума не совпадает с частотой колебаний. Установлено, что никакой алгоритм уточнения ДПФ не может обеспечить абсолютно точного вычисления частоты колебаний, представленных в виде дискретной последовательности выборок, так как сдвиг максимума амплитудного спектра из-за интерференции боковых лепестков в спектре вносит принципиально неустранимую погрешность, которая может превышать величину $1/4N$. Применение спектральных окон в принципе эффективно в случае монохроматического сигнала, однако проблема усугубляется, если спектр колебаний содержит несколько близких гармоник, так как интерференция пиков в амплитудном спектре приводит к сдвигу их максимумов в любом диапазоне. Практический опыт показывает, что в реальных задачах диагностики пучка возможно улучшить точность ДПФ на 1–2 порядка с помощью методов уточнения и спектральных окон.

В **Главе 3** рассмотрены методы расчета импедансов связи. Приводятся приближенные аналитические формулы для оценок широкополосного импеданса, вносимого излучением, пространственным зарядом, сопротивлением стенок вакуумной камеры, изменениями поперечного сечения камеры, отверстиями в стенках камеры, пикап-электродами, полосковыми линиями и высшими модами ускоряющих резонаторов.

Для более точного расчета wake-полей и импедансов в практически важных структурах используются компьютерные программы трехмерного моделирования wake-полей, такие как MAFIA и GdfidL. С целью проверки надежности вычислений проведено сравнительное исследование программ MAFIA и GdfidL. Для расчета продольных и поперечных wake-потенциалов использовались три простейшие структуры: цилиндрическая вакуумная камера со скачкообразным изменением сечения и сглаженные переходы сечения в цилиндрической и прямоугольной камерах. Численные расчеты также сравнивались с приближенными аналитическими формулами. Было выяснено, что обе программы дают результаты, согласующиеся с точностью не хуже 10%.

В этой же главе представлены практические результаты расчета и оптимизации импедансов вакуумной камеры секций вигглеров-затухателей, произведенных в ИЯФ СО РАН для источника СИ PETRA III (DESY,

Германия), а также оценки импедансов для источника СИ ALBA (Испания).

Глава 4 посвящена методам экспериментального изучения импедансов связи. Вычисление импедансов ускорителей, вакуумная камера которых имеет большое число неоднородностей, является весьма сложной и трудоемкой задачей. Однако в таких случаях импедансы могут исследоваться экспериментально путем анализа движения пучка. Действительная (резистивная) и мнимая (реактивная) части импеданса проявляются в различных физических эффектах, что позволяет определить их величины, используя результаты пучковых измерений.

Действительная часть продольного импеданса приводит к когерентным потерям энергии, квадратично зависящим от заряда пучка. Коэффициент пропорциональности k_{\parallel} называют продольным фактором когерентных потерь (longitudinal loss factor). Он зависит как от свойств вакуумной камеры, характеризуемых wake-потенциалом W_{\parallel} , так и от продольного распределения плотности пучка λ . Так же, как и потери на синхротронное излучение, когерентные потери энергии компенсируются в ускоряющих резонаторах на каждом обороте пучка. Если потери энергии пучка компенсируются локально (один резонатор или несколько, расположенных рядом), то когерентные потери энергии приводят к искажению орбиты в местах с ненулевой дисперсионной функцией в зависимости от тока пучка. На этом эффекте основан способ измерения фактора когерентных потерь по искажению орбиты в зависимости от тока пучка. Продольный фактор когерентных потерь может быть также определен по измерениям зависимости равновесной фазы ускоряющего напряжения от среднего тока пучка.

Если широкополосный импеданс имеет индуктивный характер, абсолютное значение нормализованного продольного импеданса $|Z_{\parallel}/n|$ может быть определено по измеренной зависимости длины сгустка σ_z от тока, описываемой известным кубическим уравнением. Однако это способ неприменим в случае очень коротких сгустков ($\sigma_z \ll b$, где b — поперечный размер вакуумной камеры), когда вклад высокочастотных резонансных составляющих импеданса становится преобладающим.

В результате взаимодействия пучка с действительной частью поперечного импеданса $\text{Re}Z_{\perp}$ возникает хорошо изученный хроматический head-tail-эффект. При положительном хроматизме когерентная мода ко-

лебаний затухает с характерным временем, пропорциональным току пучка, и величина $\text{Re}Z_{\perp}$ может быть определена по измеренным значениям времени быстрого затухания когерентных бетатронных колебаний, возбуждаемых ударом кикера.

Мнимая часть поперечного импеданса $\text{Im}Z_{\perp}$ приводит к когерентному сдвигу бетатронной частоты, пропорциональному току пучка. Зависимость сдвига частоты от тока может быть измерена с высокой точностью, что позволяет определить среднее взвешенное по бета-функции значение реактивного поперечного импеданса. В этой главе представлены результаты измерений суммарного продольного и поперечного импедансов электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М и источника СИ Elettra (Италия).

Описан новый метод измерения локального поперечного импеданса, основанный на анализе искажения равновесной орбиты пучка. Поскольку шумовая погрешность датчиков положения пучка пропорциональна квадратному корню из полосы частот, этот метод дает лучшее разрешение по сравнению с ранее известным методом, основанным на измерении набега бетатронной фазы, так как датчики положения пучка используются в узкополосном режиме (измерение орбиты), а не в широкополосном (пооборотные измерения колебаний). Метод измерения локального импеданса по искажению орбиты пучка достаточно универсален, обеспечивая в принципе измерение двумерной топологии электромагнитного поля, наведенного пучком в окружающей структуре. Точность метода может быть сделана достаточно высокой, она определяется шумовым разрешением системы диагностики и возможностью создания короткого локального искажения орбиты. Измеренные данные могут быть использованы для исследования гармонического состава поперечного импеданса. Частотная зависимость импеданса связи также может быть измерена путем варьирования длины сгустка. Описанный метод был успешно применен для измерения азимутального распределения импеданса электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М, а также в лаборатории Sincrotrone Trieste (Италия) для измерения импеданса скрепера с регулируемой апертурой, установленного на накопителе электронов Elettra для обеспечения радиационной безопасности.

В **Главе 5** проведен анализ механизмов возбуждения и подавления неустойчивостей пучка.

Большинство современных лептонных накопителей — источников СИ и коллайдеров — работают в многосгустковом режиме. Взаимодействие пучка с высшими модами ускоряющих резонаторов и резистивным сопротивлением стенок вакуумной камеры может приводить к возбуждению многосгустковых неустойчивостей, которые являются одними из самых распространенных причин ухудшения качества пучка и ограничения интенсивности в накопителях электронов.

Один из способов подавления многосгустковой неустойчивости — внесение разброса частот колебаний частиц в сгустке для подавления когерентности колебаний. Поскольку условием возбуждения многосгустковой неустойчивости является когерентность колебаний частиц в каждом сгустке (колебания центра масс сгустка), разброс частот приводит к разности фаз колебаний отдельных частиц и потере когерентности. При этом частицы продолжают колебаться, но колебания центра масс пучка затухают. Если сила, возбуждающая неустойчивость, пропорциональна амплитуде колебаний сгустка как целого, она также исчезает. Некогерентные колебания частиц затухают в синхротронах и накопителях по радиационному механизму.

Необходимый разброс частот в пучке может обеспечиваться с помощью октуполей или секступолей. Октуполи вносят амплитудно-зависимый сдвиг бетатронной частоты как эффект первого порядка, а секступоли, основным воздействием которых на пучок является сдвиг частоты в зависимости от продольного импульса, во втором порядке также вносят амплитудно-зависимый сдвиг бетатронной частоты, который может оказаться достаточным для обеспечения требуемого разброса частот в сгустке. Влияние нелинейности, вносимой гармоническими секступолями в горизонтальные бетатронные колебания, исследовалось экспериментально в сравнении с результатами численного моделирования и аналитических оценок.

Проведенные исследования поперечной многосгустковой неустойчивости пучка в источнике СИ третьего поколения Elettra показали, что неустойчивость может быть эффективно подавлена с помощью расфазировки колебаний частиц, вносимой семейством гармонических секступолей. По эффективности подавления неустойчивости секступоли оказа-

лись сравнимыми с октуполями, обычно используемыми для регулирования амплитудно-зависимого сдвига бетатронных частот, но отсутствующими в магнитной структуре накопителя Elettra и других источников СИ третьего поколения. В результате исследований было определенно выяснено, что затухание когерентной моды вызывается разбросом частот колебаний частиц внутри сгустка и может быть эффективным как в случае многосгустковой, так и односгустковой неустойчивости.

Неустойчивость поперечных связанных мод (ТМС или fast head-tail) является существенным фактором, ограничивающим интенсивность пучка в циклических электронных ускорителях. Эта неустойчивость возникает, когда ток сгустка превышает пороговую величину, определяемую широкополосным импедансом вакуумной камеры.

При ненулевом хроматизме магнитной структуры возникает беспороговый хроматический head-tail-эффект, когда инкременты/декременты head-tail мод имеют ненулевые значения при любом токе пучка. Если положительный хроматизм достаточно велик, то наблюдается эффект быстрого затухания когерентных бетатронных колебаний с характерным временем, обратно пропорциональным току пучка. При определенных условиях быстрое затухание может подавлять ТМС-неустойчивость, этот эффект наблюдался в ИЯФ им. Будкера на электрон-позитронных коллайдерах ВЭПП-2 и ВЭПП-4М, а также на накопителе электронов — источнике СИ ESRF (Франция).

Другим механизмом, подавляющим ТМС-неустойчивость, может оказаться потеря когерентности колебаний из-за нелинейности магнитной структуры. Для анализа устойчивости бетатронных колебаний, принимая во внимание ТМС-неустойчивость, хроматический head-tail-эффект, а также потерю когерентности колебаний за счет хроматизма и нелинейности, была разработана многочастичная численная модель. В этой модели пучок представлен в виде ансамбля N_p макрочастиц, имеющих гауссовское начальное распределение по амплитудам бетатронных и синхротронных колебаний и равномерное распределение по фазам. Взаимодействие частиц друг с другом, приводящее к ТМС-неустойчивости и хроматическому head-tail эффекту, представлено в виде мгновенного приращения комплексной амплитуды колебаний частицы, производимого суперпозицией wake-полей, индуцированных всеми предыдущими частицами. Поскольку принимается во внимание только широкополосный

импеданс, wake-поля считаются полностью затухающими за один оборот. Радиационное затухание моделируется на каждом обороте как экспоненциальный множитель, обратная связь может быть введена в виде мгновенного удара, пропорционального поперечному импульсу. Стабильность поперечных колебаний пучка исследовалась с помощью многочастичного многооборотного трекинга на основе вышеописанной модели. Для заданных величин хроматизма и нелинейности производились расчеты с различными значениями тока пучка. Если в процессе трекинга какая-либо частица достигает пределов апертуры, она исключается из дальнейших расчетов, а ток пучка уменьшается на соответствующую величину. Таким образом можно построить наглядную диаграмму максимально возможного тока пучка в одном сгустке в зависимости как от хроматизма, так и от нелинейности, с обратной связью или без нее.

Влияние хроматических и нелинейных эффектов на устойчивость пучка ранее экспериментально исследовалось в ИЯФ им. Будкера на накопителе ВЭПП-3. Похожие эффекты также наблюдались на КЕК Photon Factory (Япония). Тем не менее, надо помнить, что очень большая нелинейность может приводить к другим нежелательным эффектам, таким как сокращение времени жизни, уменьшение динамической апертуры и т.д. Проведенные расчеты дают надежду на то, что даже без обратной связи возможно превысить пороговый ток ТМС-неустойчивости. Так, путем настройки хроматизма и нелинейности магнитной структуры удалось настроить режим ВЭПП-4М, позволяющий вдвое превысить пороговый ток ТМС-неустойчивости.

В настоящее время большинство ускорительных установок оснащаются быстрыми системами обратной связи для пооборотного (turn-by-turn) подавления поперечных и продольных неустойчивостей движения пучка. Развитие цифровой техники позволяет создавать системы обратной связи, управляющие движением каждого сгустка в многосгустковом режиме (bunch-by-bunch). В этой главе описаны системы продольной и поперечной обратной связи, разработанные для стабилизации пучка ВЭПП-4М. Приведены результаты исследования эффективности новой цифровой системы поперечной обратной связи ВЭПП-4М, получено более чем трехкратное превышение порогового тока ТМС-неустойчивости.

В **Заключении** перечислены основные результаты работы:

1. Разработаны эффективные методы спектрального анализа колебаний пучка, востребованные в экспериментальных исследованиях как коллективных эффектов и неустойчивостей, так и других интересных аспектов динамики пучка. Установлено, что никакой алгоритм уточнения дискретного преобразования Фурье не может обеспечить абсолютно точного вычисления частоты колебаний, представленных в виде дискретной последовательности выборок. Причина принципиально неустранимой погрешности — сдвиг максимума амплитудного спектра из-за интерференции спектров соседних периодов. Практический опыт показывает, что в реальных задачах диагностики пучка возможно улучшить точность ДПФ на 1–2 порядка с помощью методов уточнения и спектральных окон. Разработанные алгоритмы впервые в России и одними из первых в мире были применены для рутинной диагностики пучка.
2. Разработан новый оригинальный метод измерения азимутального распределения импеданса связи, основанный на измерении искажения равновесной орбиты пучка локальным поперечным импедансом и обеспечивающий существенно лучшую точность по сравнению с известным методом, базирующимся на измерении набега бетатронной фазы. Впервые в мире метод был успешно применен на комплексе ВЭПП-4 для измерения азимутального распределения импеданса циклического ускорителя, а также для измерения импеданса, вносимого скрепером с регулируемой апертурой, установленным на источнике СИ Elettra для обеспечения радиационной безопасности.
3. Впервые в мире экспериментально показано, что поперечная многосгустковая неустойчивость пучка в накопителе электронов может быть эффективно подавлена с помощью расфазировки колебаний частиц, вносимой как эффект второго порядка семейством гармонических секступолей, без использования октупольных линз. В результате исследований, проведенных на источнике СИ третьего поколения Elettra, было определено установлено, что потеря когерентности происходит из-за разброса частот колебаний частиц внутри сгустка, и может эффективно подавлять как случае многосгустковую, так и односгустковую неустойчивости.

4. Для анализа устойчивости бетатронных колебаний, принимая во внимание ТМС-неустойчивость, хроматический head-tail-эффект, а также потерю когерентности колебаний за счет хроматизма и нелинейности, была разработана многочастичная численная модель. Полученные результаты численного моделирования дают надежду на то, что даже без обратной связи возможно превысить пороговый ток ТМС-неустойчивости, повышая хроматизм и нелинейность магнитной структуры. На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М впервые получено двукратное превышение порогового тока ТМС-неустойчивости без применения обратной связи, за счет хроматического и нелинейного механизмов подавления неустойчивости.
5. Проведены исследования эффективности новой цифровой системы поперечной обратной связи ВЭПП-4М в режимах с различными значениями вертикального хроматизма. Измерения показали, что обратная связь более эффективна при положительном хроматизме, чем при отрицательном. Была также обнаружена довольно сильная зависимость от нелинейности магнитной структуры. Достигнуто более чем трехкратное превышение порогового тока ТМС-неустойчивости, причем ограничение тока инжектированного пучка определялось бустерным накопителем ВЭПП-3, а не системой обратной связи.
6. С помощью программ трехмерного моделирования wake-полей проведены расчет и оптимизация импедансов вакуумной камеры секций вигглеров-затухателей, спроектированных и изготовленных в ИЯФ СО РАН для источника СИ PETRA III (DESY, Германия) с целью уменьшения эмиттанса электронного пучка. Вакуумная камера секций, имеющая сложное поперечное сечение из-за наличия приемников излучения для поглощения беспрецедентно большой мощности СИ, не имеет аналогов в мире. Измерения, проведенные в процессе ввода в эксплуатацию накопителя PETRA III, подтвердили расчетные оценки коллективных эффектов.
7. Проведено важное с практической точки зрения сравнительное исследование программ трехмерного моделирования wake-полей MAFIA и GdfidL, широко используемых для расчета wake-потенциалов и импедансов элементов вакуумной камеры проектируемых

ускорителей. Показано, что для простейших модельных структур, таких как цилиндрическая камера со скачкообразным изменением сечения и сглаженные переходы сечения в цилиндрической и прямоугольной камерах, обе программы дают результаты, согласующиеся с точностью не хуже, чем 10%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] *Kiselev V., Levichev E., Sajaev V., Smaluk V.* Experimental Study of Nonlinear Beam Dynamics at VEPP-4M // Nucl. Instr. and Meth. A 406 (1998) pp. 356–370 .
- [2] *Tosi L., Smaluk V., Karantzoulis E.* Landau damping via the harmonic sextupole // Phys. Rev. ST Accel. Beams. Vol. 6. (2003) 054401.
- [3] *Karantzoulis E., Smaluk V., Tosi L.* Broad Band Impedance Measurements on the Electron Storage Ring ELETTRA // Phys. Rev. ST Accel. Beams. Vol. 6. (2003) 030703.
- [4] *Kiselev V., Smaluk V.* Measurement of Local Impedance by an Orbit Bump Method // Nucl. Instr. and Meth. A 525 (2004) pp. 433–438 .
- [5] *Smaluk V.* Discrete spectral analysis of beam oscillation // Nucl. Instr. and Meth. A 578 (2007) pp. 306–314.
- [6] *Kiselev V.A., Muchnoi N.Yu., Meshkov O.I., Smaluk V.V., Zhilich V.N., Zhuravlev A.N.* Beam Energy Spread Measurement at the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Journal of Instrumentation, Vol. 2 (2007) P06001.
- [7] *Bogomyagkov A.V., Gurko V.F., Zhuravlev A.N., Zubarev P.V., Kiselev V.A., Meshkov O.I., Muchnoi N.Yu., Selivanov A.N., Smaluk V.V., Khilchenko A.D.* New fast beam profile monitor for electron-positron colliders // Rev. Sci. Instrum. Vol. 78 (2007) 043305.
- [8] *Smaluk V., Wanzenberg R.* Geometrical Impedance of the PETRA III Damping Wiggler Section // ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 45, (2008) pp. 139–146.

- [9] *Kurkin G.Ya., Osipov V.N., Petrov V.M., Rotov E.A., Krutikhin S.A., Motygin S.V., Karnaev S.E., Smaluk V.V* Commissioning of the VEPP-4M Longitudinal Feedback System // ICFA Beam Dynamics Newsletter No. 48 (2009) pp. 191–195.
- [10] *Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомяжков А.В., ..., Смалюк В.В. и др.* Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М // ЖЭТФ т. 136, вып. 4 (2009) 690–702.
- [11] *Anchugov O.V., Blinov V.E., Bogomyagkov A.V., ..., Smaluk V.V. et al.* Experiments on the Physics of Charged Particle Beams at the VEPP-4M Electron-Positron Collider // Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 109, No. 4 (2009), pp. 590–601.
- [12] *Смалюк В.В.* Механизмы подавления неустойчивости поперечных связанных мод в циклическом ускорителе // ЖЭТФ т. 135, вып. 3 (2009) 550–558.
- [13] *Smaluk V.V.* Mechanisms for suppressing the transverse mode coupling instability in a circular accelerator. // Journal of Experimental and Theoretical Physics, Vol. 108, No. 3 (2009) pp. 482–489.
- [14] *Анчугов О.В., Блинов В.Е., Богомяжков А.В., ..., Смалюк В.В. и др.* Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4М с детектором КЕДР // Приборы и техника эксперимента, 2010, № 1, 20–33.
- [15] *Anchugov O.V., Blinov V.E., Bogomyagkov A.V., ..., Smaluk V.V. et al.* Use of the Methods of Accelerator Physics in Precision Measurements of Particle Masses at the VEPP-4 Complex with the KEDR Detector // Instruments and Experimental Techniques, 2010, Vol. 53, No. 1, pp. 15–28.
- [16] *Дубровин А.Н., Калинин А.С., Симонов Е.А., Смалюк В.В., Шатиллов Д.Н.* Измерение и коррекция бета-функции накопителя ВЭПП-4М // Труды XIV Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994.
- [17] *Karliner M., Kiselev V., Medvedko A., Smaluk V., Zelenin A., Zinevich N.* The Feedback System for Elimination the Fast Head-

- tail Instability at Storage Ring VEPP-4M // Proc. of EPAC-1996. Barcelona, Spain, 1996.
- [18] *Dubrovin A.N., Kalinin A.S., Shatilov D.N., Simonov E.A., Smaluk V.V.*, Applications of Beam Diagnostic System at the VEPP-4. // Proc. of EPAC-1996. Barcelona, Spain, 1996.
- [19] *Kiselev V., Smaluk V.* Experimental Study of Impedances and Instabilities at the VEPP-4M Storage Ring // Proc. of EPAC-1998. Stockholm, Sweden, 1998.
- [20] *Kiselev V., Smaluk V.* A Method for Measurement of Transverse Impedance Distribution along a Storage Ring // Proc. of DIPAC-1999. Chester, UK, 1999.
- [21] *Kalinin A., Smaluk V.* Turn-by-turn Phase Space Diagram Construction for Nonlinear Betatron Oscillations // Proc. of DIPAC-1999. Chester, UK, 1999.
- [22] *Bulfone D., Bocchetta C.J., Bressanutti R., ..., Smaluk V. et al.* First Commissioning Results of the ELETTRA Transverse Multi-bunch Feedback // Proc. of DIPAC-2001. Grenoble, France, 2001.
- [23] *Tosi L., Smaluk V., Bulfone D., Karantzoulis E., Lonza M.* Diagnostics and Analysis of Instabilities with the Digital Transverse Multibunch Feedback at ELETTRA // Proc. of PAC-2001. Chicago, USA, 2001.
- [24] *Tosi L., Smaluk V., Karantzoulis E.* Measurements and Simulations of the Damping Effect of the Harmonic Sextupole on Transverse Instabilities // Proc. of EPAC-2002. Paris, France, 2002.
- [25] *Tosi L., Karantzoulis E., Smaluk V.* Measurements of the Impedance Introduced by the Vertical Scraper at ELETTRA and its Effects // Proc. of EPAC-2002. Paris, France, 2002.
- [26] *Cherepanov V.P., Dementev E.N., Medvedko A.S., Smaluk V.V., Sukhanov D.P.* The VEPP4-M transverse bunch-by-bunch feedback system // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, Russia, 2006.
- [27] *Smaluk V., Einfeld D.* Impedance Estimation for the ALBA Storage Ring // Proc. of RuPAC-2006. Novosibirsk, Russia, 2006.
- [28] *Cherepanov V., Dementev E., Levichev E., Medvedko A., Smaluk V., Sukhanov D.* Transverse Bunch-by-bunch Feedback for the VEPP-4M Electron-positron Collider // Proc. of DIPAC-2007. Venice, Italy, 2007.

- [29] *Смалюк В.В.* Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях. Новосибирск: Параллель, 2009, 294 с. с ил.
- [30] *Smaluk V.* Particle beam diagnostics for accelerators — Instruments and methods. Saarbrücken: VDM Publishing, 2009, 276 p. ill.
- [31] *Смалюк В.В.* Диагностика пучка в ускорителях заряженных частиц. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2008, 257 с. с ил.

СМАЛЮК Виктор Васильевич

**Подавление коллективных неустойчивостей пучка
в электрон-позитронных накопителях**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 2.04.2010 г.

Подписано в печать 5.04.2010 г.

Формат бумаги 100×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 12

Обработано на ИВМ РС и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.