

На правах рукописи

ПЕТРЕНКО Алексей Васильевич

МОДЕЛЬНО-НЕЗАВИСИМЫЙ АНАЛИЗ
И КАЛИБРОВКА МОДЕЛЕЙ ПОПЕРЕЧНОГО ДВИЖЕНИЯ
ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЯХ

01.04.20 – физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ДИКАНСКИЙ
Николай Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, академик, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КООП
Иван Александрович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, главный научный сотрудник.

ТРУБНИКОВ
Иван Александрович – кандидат физико-математических наук, член-корр. РАН, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, зам. директора Лаборатории физики высоких энергий по научной работе.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий», г. Протвино.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2012 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

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

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные ускорители и накопители заряженных частиц являются сложными установками, в которых качество пучка зависит от большого числа скрытых параметров. Например, несмотря на то, что характерная точность стабилизации тока в обмотках электромагнитов накопителей $\Delta I/I \sim 10^{-5}$, многочисленные ошибки изготовления и установки магнитных элементов (которые также могут со временем изменяться) приводят к существенному отклонению реальной оптики накопителя от проектных значений. Настройка и последующий контроль электронно- или ионно-оптических параметров накопителя являются важными задачами, для решения которых существует множество подходов, зависящих от конкретного типа установки. Данная работа посвящена методам измерения и контроля оптики накопителей путем наблюдения реакции пучка на различные возмущения его поперечного движения. В ускорительной технике задача развития методик измерения и контроля оптических параметров накопителей заряженных частиц является актуальной и востребованной в настоящее время на многих установках, как на новых, так и на давно работающих.

Цель диссертационной работы

Целью настоящей работы являлось развитие существующих методов измерения и контроля ускорительной оптики, а также практическое применение этих методов на следующих установках:

протон-антипротонном коллайдере Тэватрон (ускорительная лаборатория им. Ферми, США);

быстроциклическом протонном синхротроне (Бустере) в лаборатории им. Ферми;

накопителе ионов ESR (исследовательский центр GSI, Дармштадт, Германия);

накопителе-охладителе (e^+/e^-) Инжекционного комплекса ВЭПП-5 (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН).

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им непосредственно разработана новая методика разделения смешанных мод в модельно-независимом анализе связанных бетатронных колебаний. Автор принимал активное и ключевое участие во всех описанных в данной диссертации экспериментах по калибровке моделей различных накопителей.

Научная новизна

Предложена новая методика разделения смешанных мод в корреляционном модельно-независимом анализе связанных бетатронных колебаний. Данная методика успешно применялась на протон-антипротонном коллайдере Тэватрон (ускорительная лаборатория им. Ферми, США) для модельно-независимого определения оптических функций коллайдера. Также предложен и протестирован основанный на модельно-независимом анализе способ определения положения вибрирующих квадруполей в накопителях.

Методом матрицы откликов впервые проведено измерение оптики и локальная коррекция связи между горизонтальными и вертикальными бетатронными колебаниями в быстроциклическом синхротроне (Бустере в лаборатории им. Ферми) на протяжении всего цикла ускорения пучка.

Методом матрицы откликов также впервые получены точные модели оптики накопителя тяжелых ионов ESR (исследовательский центр GSI, Германия) и накопителя-охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5 (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН). Определены источники ошибок фокусировки в этих накопителях.

В накопителе-охладителе Инжекционного комплекса ВЭПП-5 впервые получен пучок электронов с параметрами, близкими к проектным.

В диссертации также рассмотрена возможность использования пучков накопителя-охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5 для экспериментов по исследованию плазменного кильватерного ускорения. Для целей данного эксперимента предложена новая методика продольной коллимации пучка в накопителе.

Научная и практическая ценность

Метод модельно-независимого анализа бетатронных колебаний пучка в накопителях расширен для практически важного случая перекрывающихся синхробетатронных сателлитов, соответствующих разным частотам бетатронных колебаний. Создано программное обеспечение для модельно-независимого анализа поворотных данных с датчиков положения пучка в накопителях.

Метод калибровки модели оптики накопителя по измеренной матрице откликов замкнутой орбиты пучка на вариацию дипольных корректоров успешно применен для измерения и коррекции оптики быстроциклического синхротрона.

Созданы калиброванные компьютерные модели оптической структуры накопителя тяжелых ионов ESR и накопителя-охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5. Определены источники ошибок фокусировки в этих накопителях. Полученные модели (а также методы их калибровки) можно в дальнейшем использовать при настройке этих накопителей, что особенно

важно для получения позитронного пучка в накопителе-охладителе Инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Предложенный метод продольной коллимации пучка в накопителе (при условии его экспериментального подтверждения) существенно упрощает проведение некоторых экспериментов по исследованию плазменного кильватерного ускорения.

Основные положения, выносимые на защиту

Новая методика разделения смешанных мод, соответствующих связанным бетатронным колебаниям, в модельно-независимом анализе пооборотных сигналов с датчиков положения пучка накопителей.

Калибровка оптической модели и коррекция оптики быстроциклического протонного синхротрона на протяжении всего цикла ускорения пучка методом матрицы откликов замкнутой орбиты.

Калибровка моделей накопителей комбинированным методом матрицы откликов орбиты и частот бетатронных колебаний пучка.

Новая схема продольной коллимации пучка в накопителе для создания коротких сгустков, необходимых в экспериментах по исследованию плазменного кильватерного ускорения.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), на международных научных конференциях и семинарах: European Particle Accelerator Conference EPAC'08 (Genoa, Italy, 2008); 14th Advanced Accelerator Concepts Workshop (Annapolis, MD, USA, 2010); CERN Workshop "Optics Measurements, Corrections and Modelling for High-Performance Storage Rings" (Geneva, Switzerland, 2011); International Particle Accelerator Conference IPAC'2012 (New Orleans, Louisiana, USA, 2012). Кроме этого, результаты диссертационной работы содержатся в статьях в 3-х реферируемых научных журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения, общим объемом 135 страниц, включая 3 таблицы, 51 рисунок и список цитированной литературы из 49 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и обсуждается современное состояние проблемы измерения и контроля оптики накопителей заряженных частиц, формулируется цель работы, кратко излагаются основные полученные результаты.

В первой главе дается обзор современных методов измерения линейной оптики циклических ускорителей и накопителей заряженных частиц. Изложены теоретические основы разных методов и сделан акцент на тех их особенностях, которые оказались важны в экспериментальной части работы.

Существующие подходы к измерению ускорительной оптики можно разделить на две категории: модельно-независимые и модельно-зависимые методы. В первом случае интересующие нас характеристики установки измеряются напрямую, тогда как во втором случае измеренные данные используются для калибровки компьютерной модели накопителя и далее по калиброванной модели вычисляются важные для экспериментов параметры установки. Два этих метода выгодно сочетать, используя, например, результаты быстрых модельно-независимых измерений для проверки точности калибровки модели.

В качестве основного модельно-зависимого подхода в последние годы широко используется метод матрицы откликов замкнутой орбиты. Его преимущества заключаются в высокой точности и универсальности — этот метод можно применить практически для любого накопителя, так как требуется измерять только положение замкнутой орбиты пучка. Основным недостатком этого метода следует признать большое время снятия полной матрицы откликов. Например, на протон-антипротонном коллайдере Тэватрон эти измерения занимали 2 часа пучкового времени и поэтому их нельзя было проводить достаточно часто.

В разделе 1.1 приведены теоретические основы метода калибровки модели накопителя на основе измеренной матрицы откликов замкнутой орбиты и частот бетатронных колебаний на вариацию дипольных и квадрупольных корректоров. Выводятся аналитические выражения для измеряемых откликов. Несмотря на то, что программы расчета ускорительной оптики обычно имеют встроенные модули, вычисляющие эти характеристики, всегда полезно иметь аналитическую модель, с помощью которой можно проверить программу. В процессе работы над диссертацией такой подход позволил выявить несколько существенных ошибок и уточнить области корректного использования некоторых функций в программе *Elegant*. При выводе выражения для отклика замкнутой орбиты в случае непрерывного (небанчиванного) пучка в накопителе показано, что длина замкнутой орбиты меняется линейно пропорционально силе варьируемого дипольного корректора, причем коэффициент пропорциональности равен величине дисперсионной функции в корректоре. Это соотношение позволяет

определить значение дисперсионной функции в местах расположения дипольных корректоров ионного накопителя путем измерения отклика периода обращения пучка на вариацию дипольных корректоров. Также дается подробное описание методики построения оптимизационной функции, использующейся в процессе калибровки модели накопителя.

В разделе 1.2 дано краткое описание гармонического метода анализа поворотных измерений с датчиков положения пучка, регистрирующих когерентные бетатронные колебания пучка в накопителе (возбужденные, например, коротким ударом инфлектора). Этот метод является наиболее широко используемым модельно-независимым способом измерения оптики накопителей.

В разделе 1.3 описан корреляционный модельно-независимый анализ поворотных данных, являющийся альтернативой традиционному гармоническому анализу. В данной диссертации следуя установившейся в англоязычной литературе традиции под модельно-независимым анализом (сокращенно МНА) подразумевается именно корреляционный статистический анализ данных с датчиков, синхронно записывающих положение пучка на каждом обороте. Суть МНА состоит в том, чтобы представить все измеренные на датчиках сигналы в виде линейной комбинации небольшого числа ортогональных компонент. Результирующие базисные компоненты сигналов называются временными модами МНА. Каждой временной моде соответствует пространственная мода, показывающая вклад данной временной моды в измеренный сигнал на том или ином датчике положения пучка. Другими словами, пространственная мода показывает вариацию амплитуды временной моды вдоль накопителя. Реализуется МНА при помощи сингулярного разложения матрицы истории пучка, составленной из всех измеренных сигналов с датчиков положения пучка. В результате каждой паре мод соответствует сингулярное число, пропорциональное вкладу этих мод в исходную матрицу измерений.

Важным преимуществом МНА по сравнению с гармоническим анализом является независимость результатов МНА от хроматического уширения спектральных линии когерентных бетатронных колебаний, которое усложняет обработку поворотных измерений вблизи линейного разностного резонанса связи (из-за перекрытия синхробетатронных сателлитов).

Во второй главе объясняется связь между пространственными модами МНА, соответствующими связанным бетатронным колебаниям, и оптическими функциями накопителя. Показано, что вычисление оптических функций накопителя по модам МНА сводится к нахождению нескольких углов матрицы вращения, разделяющей связанные моды МНА. Далее приводится описание и теоретическое обоснование нового метода разделения смешанных мод в модельно-независимом анализе связанных бетатронных колебаний в накопителях. Суть метода состоит в том, чтобы рассматривать каждый датчик положения пучка как два датчика, разделенных ровно на один

оборот. Так как набег фаз бетатронных колебаний за полный оборот в накопителе равен частоте бетатронных колебаний, набег фаз между такими датчиками-близнецами не зависит от положения исходного датчика в кольце и равен частоте бетатронных колебаний. Это дает чувствительный критерий разделения мод МНА, так как набег фаз бетатронных колебаний между датчиками может быть вычислен по разделенным пространственным модам МНА.

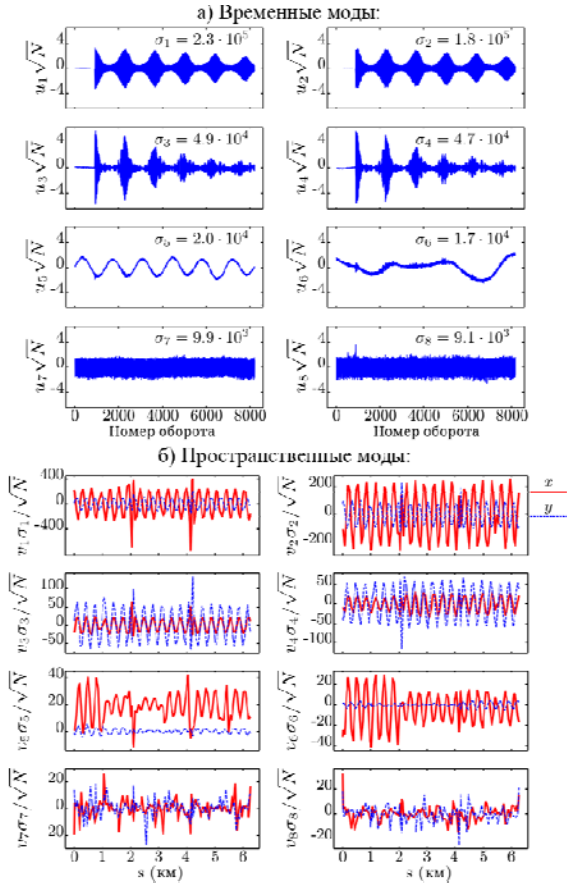


Рис. 1. Результат модельно-независимого анализа пооборотных измерений на Тэватроне. а) основные временные моды u_i и соответствующие им сингулярные числа (σ_i), б) пространственные моды v_i на горизонтальных (x) и вертикальных (y) датчиках, построенные в зависимости от положения датчика в кольце. N – число записанных датчиками оборотов пучка.

Третья глава посвящена анализу экспериментальных данных с использованием методик, описанных в предыдущих двух главах. В разделе 3.1. приводятся результаты модельно-независимого анализа пооборотных данных с датчиков положения пучка на Тэватроне. Особенностью Тэватрона является то, что в этом коллайдере рабочая точка расположена близко к разностному резонансу связи и поэтому синхробетатронные сателлиты, соответствующие разным бетатронным частотам, могут перекрываться, что затрудняет, либо делает невозможным применение традиционного частотного анализа пооборотных данных. Типичный результат МНА показан на рис. 1.

Первые четыре моды МНА на рис. 1 соответствуют когерентным бетатронным колебаниям, возбужденным в Тэватроне горизонтальным ударом инфлектора. Пятая мода возникает из-за постоянно присутствующих в протонном пучке когерентных синхротронных колебаний (пространственная компонента этой моды пропорциональна дисперсионной функции Тэватрона). Шестая мода возникает из-за вибрации квадрупольного фокуса. Седьмая и восьмая мода соответствует слабым шумам. Измеренный сигнал на каком-либо датчике положения пучка можно восстановить с хорошей точностью в виде суммы временных мод, каждая из которых умножена на соответствующее значение пространственной моды на этом датчике.

Для вычисления оптических функций по измеренным пространственным модам МНА использовался описанный во второй главе алгоритм разделения мод. Измеренные оптические функции использовались для проверки предсказаний модели Тэватрона, откалиброванной ранее методом матрицы откликов орбиты.

Чтобы сравнить предложенный нами метод вычисления оптических функций с другими методами, было проведено численное моделирование различных возможных экспериментов на Тэватроне. В численном моделировании заранее известны оптические функции кольца, поэтому легко понять, какой из методов дает наилучший результат. В качестве меры точности метода использовалось среднеквадратичное по всем датчикам отклонение бетатронной функции от модельного значения. На рис. 2 показан результат такого сравнения различных методов определения оптических функций в зависимости от разделения частот бетатронных колебаний. Видно, что предложенный нами алгоритм имеет явное преимущество по сравнению с использовавшимся ранее корреляционным методом EVD, но при этом в случае хорошего разделения бетатронных частот не дает выигрыша в точности по сравнению с традиционным Фурье-анализом (однако, МНА удобнее, так как он не требует определения центрального пика Фурье-спектра, который не всегда очевиден).

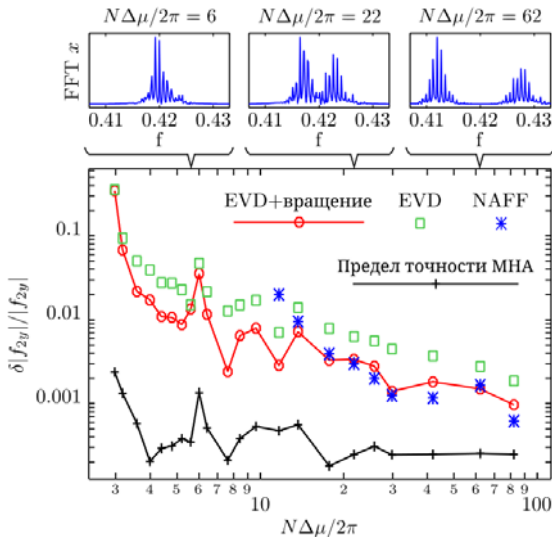


Рис. 2. Среднеквадратичная (по всем датчикам) ошибка определения амплитуды бетатронной функции в зависимости от разделения частот бетатронных колебаний. EVD обозначает наиболее эффективный из имеющихся методов статистического корреляционного анализа пооборотных данных; «EVD+вращение» обозначает предложенный нами метод вычисления оптических функций на основе описанного выше критерия разделения мод МНА; NAFF — один из вариантов традиционного Фурье-анализа данных. Также показан теоретический предел точности МНА. На вставках сверху графика показаны Фурье-спектры бетатронных колебаний.

Далее на примере модельно-независимого анализа данных с Тэватрона описан метод поиска вибрирующих квадруполь в накопителях. Суть метода состоит в том, чтобы пространственную моду, вызванную вибрацией квадруполь финального фокуса в Тэватроне (мода 6 на рис. 1), на каждой паре соседних датчиков представить в виде линейной комбинации пространственных мод, отвечающих за свободные бетатронные колебания в одной из плоскостей (моды 1 и 2 на рис. 1) и образующих базис линейно-независимых орбит в накопителе. Таким образом можно определить начальные условия для бетатронных колебаний, возбуждаемых вибрирующим квадрупольем. Эти начальные условия, посчитанные на каждой паре соседних датчиков, будут испытывать скачок в месте расположения вибрирующего квадруполья.

В разделе 3.2. приводятся результаты построения калиброванной модели линейной оптики быстрогоциклического протонного синхротрона (Бустера в лаборатории им. Ферми).

Чтобы обеспечить потребности всех планируемых экспериментов, в ближайшие 5 – 7 лет количество ускоряемых в Бустере протонов предполагается удвоить — в основном это будет достигаться за счет заполнения всех рабочих циклов ускорителя (до сих пор использовалось около половины от всех доступных циклов). Использовать все циклы Бустера в настоящее время невозможно как из-за недостаточной мощности ВЧ-системы, так и по причине предельно высокого радиационного фона. Уменьшение потерь пучка и, следовательно, уменьшение радиационной нагрузки на Бустер представляет собой сложную задачу, требующую прецизионного контроля над оптическими параметрами ускорителя на протяжении всего цикла его работы.

Для калибровки оптической модели Бустера нами был применен метод матрицы откликов замкнутой орбиты пучка. Успешное применение этого метода для быстроциклического синхротрона на протяжении всего цикла ускорения, судя по всему, нами было сделано впервые. Ранее аналогичная методика применялась для протонного синхротрона SIS-18 в лаборатории GSI (г. Дармштадт, Германия), но в этой работе матрица откликов измерялась только при инъекции либо экстракции пучка.

Измерения искажений замкнутой орбиты в Бустере проводились путем изменения токов в дипольных корректорах между отдельными импульсами ускорения. Измерение орбиты осуществлялось в 20 точках вдоль всего цикла ускорения. Также отдельно производились пооборотные измерения, во время которых пучок подвергался слабым ударам инфлекторов. Эти измерения не включались в оптимизационную функцию, а использовались только для проверки точности калибровки модели. На рис. 3 показано насколько хорошо предсказываемые калиброванной моделью значения частот бетатронных колебаний согласуются с пооборотными измерениями. До калибровки модели ни о каком согласии с измерениями говорить не приходилось, так как разница измеренных и модельных частот достигала 0,1. Полученная калиброванная модель была успешно использована для коррекции связи между горизонтальными и вертикальными бетатронными колебаниями вдоль всего цикла ускорения пучка.

Точность применяемого нами метода матрицы откликов орбиты оказалась достаточной также и для измерения более тонких эффектов, в частности, хроматизма частот бетатронных колебаний и эффекта экранировки магнитного поля корректора за счет вихревых токов, наведенных в вакуумной камере ускорителя.

В разделе 3.3. приводятся результаты калибровки модели накопителя ESR. Накопитель тяжелых ионов ESR (Experimental Storage Ring) в лаборатории GSI используется в различных экспериментах по ядерной физике уже около 20 лет, но при этом ранее не проводилось систематического измерения ионной оптики данного накопителя. В частности, не была ясна причина сильного расхождения расчетных и

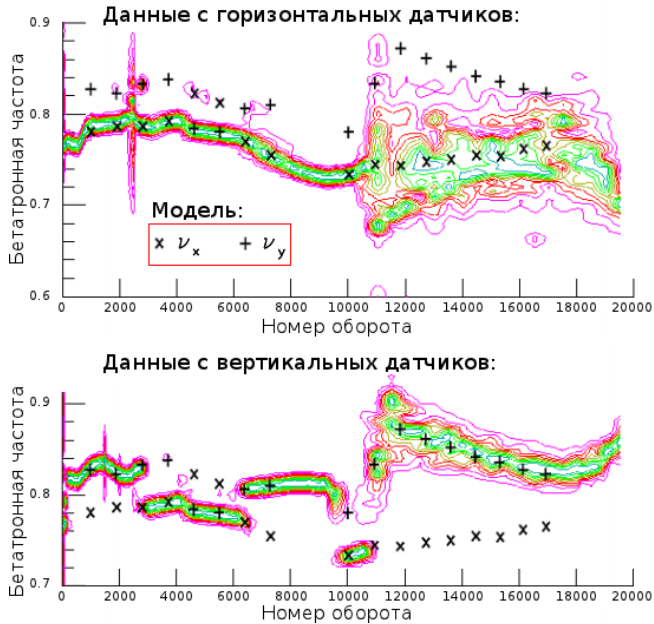


Рис. 3. Сравнение измеренных и модельных частот бетатронных колебаний пучка в Бустере (после калибровки модели). Измерения показаны линиями уровней амплитуды Фурье-спектра пооборотных данных вблизи главного пика. Приблизительно после 10000 оборотов пучка производится переход через критическую энергию.

измеренных частот бетатронных колебаний в ESR. Первоначальные попытки калибровки модели ESR по одной только матрице откликов орбиты (включая дисперсионную функцию) не дали однозначного результата — возникли сложности со сходимостью модели к реалистичному решению. Основная трудность, вероятно, была в неудовлетворительной точности измерений горизонтального положения замкнутой орбиты (горизонтальная апертура вакуумной камеры на ESR очень большая — 20 см). С другой стороны, наличие в ESR системы электронного охлаждения, позволяет получать пучки с очень малым разбросом по частотам обращения и по частотам бетатронных колебаний. Это дает возможность точного измерения откликов частот бетатронных колебаний на изменение сил квадрупольных линз. После включения в оптимизационную функцию измеренных откликов частот бетатронных колебаний, сходимость оптимизационного алгоритма улучшилась, был получен воспроизводимый набор ошибок фокусировки и показано, что основной вклад в ошибки фокусировки дают квадрупольные ESR, а не диполи, как изначально предполагалось. Система электронного охлаждения ESR позволяет получить разброс скоростей ионов в пучке

достаточно малый, чтобы можно было измерить зависимость частоты обращения непрерывного пучка от силы дипольного корректора. Так как удлинение искаженной орбиты непрерывного пучка пропорционально величине дисперсионной функции в корректоре, измеренный отклик частоты обращения дает модельно-независимое значение дисперсионной функции в корректоре.

Полученная калиброванная модель ионной оптики была использована в дальнейшем для расчета локальных искажения орбиты пучка в ESR.

В разделе 3.4. приведены результаты применения аналогичного комбинированного метода матрицы откликов орбиты и частот бетатронных колебаний для калибровки электронно-оптической модели накопителя-охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5. В этом разделе также дано описание метода измерения угла инжекции пучка в накопитель, и описана конструкция датчика потерь частиц на основе регистрации черенковского излучения в оптическом волокне.

Калибровка модели накопителя-охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5 позволила установить источники ошибок фокусировки, а также выявить несколько датчиков положения пучка и дипольных корректоров с сильными ошибками в калибровке. Для накопителя-охладителя подобная процедура принципиально важна, так как электростатические датчики положения пучка пока являются на этой установке единственной системой диагностики. Для проверки качества калибровки модели накопителя-охладителя использовался модельно-независимый анализ быстрых поворотных измерений. Кроме того, по кривым расфазировки бетатронных колебаний (см. рис. 4) удалось определить эмиттанс и энергетический разброс пучка, которые хорошо совпали с теоретическим значениям, рассчитанным по калиброванной модели.

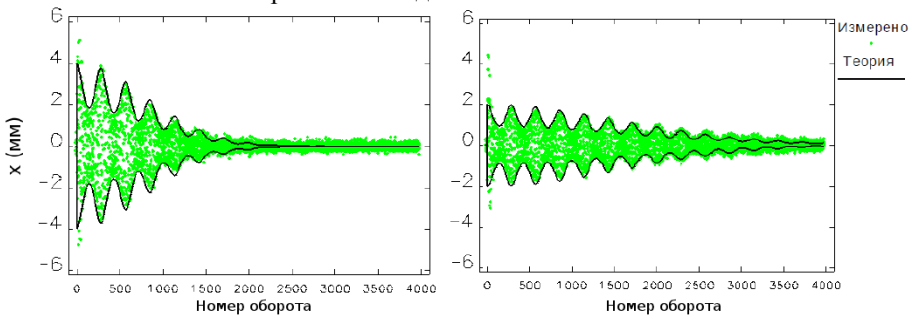


Рис. 4. Расфазировка когерентных бетатронных колебаний электронного пучка в накопителе-охладителе после удара инфлектора (две разные амплитуды удара).

В разделе 3.5. дано описание общей идеологии создания программного обеспечения для калибровки моделей различных накопителей заряженных частиц. Для этих целей широко использовалась программа моделирования ускорителей Elegant вместе с пакетом обработки данных SDDS-Toolkit. Сложные сценарии обработки данных составлялись на скриптовом языке программирования tcl-tk.

В четвертой главе обсуждаются перспективы возможных применений пучков, выпущенных из накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5, для исследования плазменного кильватерного ускорения.

В настоящее время в соседнем с накопителем-охладителем зале строится установка для исследования плазменного ускорения. Эта установка представляет собой дополнительную транспортную линию для электронных и позитронных пучков, выпущенных из накопителя. Ключевая часть данной установки — это система продольного сжатия пучка, где сантимертовый сгусток, выпущенный из накопителя-охладителя, сжимается до длины около 1 мм (чтобы получить пиковый ток масштаба 1 кА, требуемый для эффективного кильватерного ускорения). Для этого сгусток частиц пропускается сперва через ускоряющую ВЧ-структуру так, чтобы хвостовые частицы замедлились, а головные — ускорились, а затем в ахроматическом 90-градусном повороте происходит сжатие пучка за счет разницы длин траекторий частиц с разной энергией.

Для того чтобы провести предварительные тесты системы диагностики пучка и плазмы, в первую очередь планируется запустить упрощенную версию экспериментальной установки по исследованию кильватерного ускорения. В этом эксперименте пучки из накопителя-охладителя будут инжектироваться в плазму без предварительного продольного сжатия, но даже в таком случае можно наблюдать существенное изменение энергетического и углового разброса в пучке за счет развития поперечной двухпотоковой неустойчивости.

В процессе работы над измерением параметров пучка накопителя-охладителя по расфазировке бетатронных колебаний (рис. 4) возникла идея применить к пучкам в накопителе-охладителе методику продольной коллимации, основанную на том факте, что расфазировка бетатронных колебаний за счет хроматического разброса частот приводит к развороту пучка в плоскости колебаний (например, в локальных минимумах огибающей на рис. 4). Такой повернутый пучок можно пропустить через поперечный коллиматор, в результате чего, поперечным коллиматором будет определяться продольный профиль пучка. Продольная коллимация важна для исследования развития двухпотоковой неустойчивости пучка в плазме, а также для возбуждения плазменной волны последовательностью коротких сгустков. В случае успешной реализации, предложенная методика продольной коллимации пучка может существенно обогатить

экспериментальную программу с несжатыми пучками на установке по исследованию плазменного кильватерного ускорения.

В заключении формулируются основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A.V. Petrenko, A.A. Valishev and V.A. Lebedev. Model-independent analysis of the Fermilab Tevatron turn-by-turn beam position monitor measurements. // Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 092801 (2011).
2. А.В. Петренко. Калибровка электронно-оптической модели накопителя-охладителя Инжекционного комплекса ВЭПП-5. // Приборы и техника эксперимента, 2011, № 1.
3. А.В. Бурдаков, А.М. Кудрявцев, П.В. Логачев, К.В. Лотов, А.В. Петренко, А.Н. Скринский. Проект эксперимента по кильватерному ускорению на инжекционном комплексе ВЭПП-5. // Физика плазмы, 2005, т. 31, № 4.
4. A.V. Petrenko, K.V. Lotov, P.V. Logatchov, and A.V. Burdakov. The Facility for 500 MeV Plasma Wake-Field Acceleration Experiments at Budker INP. // 14th Advanced Accelerator Concepts Workshop, Annapolis, MD, USA, Edited by S. H. Gold, G. S. Nusinovich. Melville, AIP, 2010.
5. M. McAteer, S. Kopp, A. Petrenko, V. Lebedev, E. Prebys. Model Calibration and Optics Correction Using Orbit Response Matrix in the Fermilab Booster. - Proceedings of IPAC'2012, May 2012, New Orleans, Louisiana, USA. <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2012/papers/tuppc040.pdf>

ПЕТРЕНКО Алексей Васильевич

**Модельно-независимый анализ
и калибровка моделей поперечного движения
пучка в накопителях**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 18.11.2012 г.

Подписано в печать 13.11.2012 г.

Формат 60x90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 28

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11