

5/1-06

Ա.Ի. Ալիխանյանի անվան ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Ամատունի Գայանե Անդրեյի

ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՆՁԻ ՈՒՂԵԾՐԻ ԿՈՌԵԿՏԻԱՅԻ ԵՎ ՓՆՁԻ
ՊԱՐԱՄԵՏՐՆԵՐԻ ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՆ ՀԵՏ ԿԱՊԿԱԾ ՀԱՐՅԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵ ՍՃ ԵՎ ԱԷԼ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐՈՒՄ

Ա.04.20-«Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և
արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ
ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների
թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

Երևան -2006

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И. Алиханяна

Аматуни Гаяне Андреевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ И КОНТРОЛЯ
ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ИСТОЧНИКАХ СИ И ЛСЭ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.20 — «Физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника».

Ереван-2006

Ереванский Физический
Институт
научно-техническая
библиотека

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում
Գիտական ղեկավար -

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր Վ. Ս. Ցականով

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ

Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆ.
Է. Դ. Գազազյան (ԵրՖԻ),
Ֆիզմաթ. գիտ. դոկտոր Հ. Հ. Սաթևոյան
(ՌՖԻԻ)

Առաջատար կազմակերպություն

Երևանի Պետական Համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է ի հունիսի 6-ին. 2006թ. ժամը 16⁰⁰-ին ԵրՖԻ-ում գործող ԲՈՀ-ի 024 մասնագիտական խորհրդի նիստում (375036, Երևան, Ալիխանյան Եղբայրների փող. 2):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Ա. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է մայիսի 5-ին 2006 թ.

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,
Ֆիզմաթ. գիտությունների թեկնածու *Ս. Գ. Սարգսյան*

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна .

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук В. М. Цаканов

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, проф.
Э.Д. Газазян (ЕрФи),
доктор физ.-мат. наук Г.Б. Матевосян
(ИРФЭ)

Ведущая организация: Ереванский Государственный
Университет

Защита состоится 6 июня 2006г. в 16⁰⁰ч., на заседании специализированного совета ВАК 024, действующего при Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна, (375036, ул. Братьев Алиханян 2, г. Ереван)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереванского физического института им. А.И. Алиханяна.

Автореферат разослан 5 мая 2006 г.

Ученый секретарь спец. совета, к.ф.м.н. *Ս. Գ. Սարգսյան* А.Т. Маргарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области физики, биологии, химии и материаловедения требует прецизионных фотонных пучков в широком спектре длин волн от ультрафиолета до жесткого рентгена с яркостью источника порядка 10^{20} фот/сек.мм².рад². Получение таких пучков возможно с помощью интенсивных пучков заряженных частиц в режиме генерации синхротронного излучения (СИ) [1] или самоиндуцированного лазера на свободных электронах (СЛСЭ) [2]. При этом получение высокой яркости фонового пучка требует беспрецедентно прецизионного формирования электронного пучка с малым эмиттансом, высокой степени коррекции и контроля центральной траектории и основных параметров электронного пучка.

В реальном ускорителе компоненты ускорителя (магниты, квадрупольные линзы, ускоряющие секции и т.д.) установлены с конечной точностью, а поля имеют конечный допуск, что приводит к возмущению орбиты пучка и развитию различных нестабильностей. Поэтому коррекция траектории электронного пучка, исследование эффектов уширения пучка, разработка методов обратной связи контроля орбиты и основных параметров пучка являются важными задачами обеспечения проектных параметров установки.

Диссертационная работа основана на исследованиях, проведенных для проекта ТЕСЛА ЛСЭ по коррекции орбиты в основном линейном ускорителе и для проекта источника СИ CANDLE по диагностике, коррекции и контролю параметров пучка. Оба проекта относятся к актуальным установкам в области ускорительной физики и техники пучков заряженных частиц.

Целью диссертационной работы являются исследование и разработка современных методов коррекции и контроля орбиты и параметров электронного пучка с малым поперечным эмиттансом для ускорителей заряженных частиц, в частности:

- Исследование и моделирование проблемы увеличения среднеквадратичного эмиттанса пучка при последовательной коррекции центральной траектории к оси квадрупольных линз в линейных ускорителях для генерации ЛСЭ.
- Анализ поперечного дрейфа орбиты при бездисперсионной коррекции траектории и моделирование многоступенчатой коррекции орбиты в линейных ускорителях.
- Разработка архитектуры системы контроля и обратной связи в накопителях электронов для генерации СИ.
- Анализ и моделирование системы обратной связи для контроля амплитудно-фазовых характеристик высокочастотного поля в линейном ускорителе электронов.

- Исследование прецизионных методов коррекции орбиты пучка в накопителях электронов и применение метода декомпозиции сингулярных значений матрицы отклика для коррекции реальной орбиты в ускорителе.
- Развитие численных методов обработки данных о параметрах пучка и моделирование системы обратной связи.

Научная новизна работы. В настоящее время разработан ряд методов коррекции центральной траектории [4,5] в линейных ускорителях электронов, основанных на применении датчиков положения пучка и обратной связи с помощью корректирующих магнитов. Однако, из-за погрешностей установки квадрупольных линз, датчиков положения пучка и их разрешение, скорректированная траектория имеет остаточное отклонение от оси линейного ускорителя и необходимо исследовать поведение среднеквадратичного эмитанса пучка с учетом остаточного возмущения центральной траектории после ее коррекции.

В диссертационной работе исследован вопрос дисперсионного уширения эмитанса пучка в линейном ускорителе при последовательной коррекции центральной траектории пучка к геометрическому центру квадрупольных линз. Показано, что за счет хроматичности фокусирующей системы ускорителя и наличия начального энергетического разброса в пучке, распределение частиц на фазовой плоскости уширяется, что, как следствие, приводит к увеличению среднеквадратичного эмитанса на выходе из ускорителя. Получено аналитическое выражение для относительного увеличения эмитанса пучка, что хорошо согласуется с результатами численного трека частиц на примере проекта ТЕСЛА-ЛСЭ в ДЕЗИ[2].

В работе исследован важный вопрос дрейфа центральной траектории пучка при использовании бездисперсионной коррекции, когда информация о реальной траектории в ускорителе восстанавливается на основе двух траекторий соответствующих различным энергиям пучка. Показано, что за счет конечного разрешения датчиков положения пучка, после минимизации разностной траектории, центральная траектория испытывает поперечный дрейф по мере движения пучка вдоль ускорителя. На основе полученных результатов предложена и обоснована многоступенчатая коррекция центральной траектории, которая позволяет избежать накопления ошибок минимизации разностной траектории.

С учетом современных требований к источникам синхротронного излучения третьего поколения, разработана архитектура и функциональная схема системы контроля для CANDLE. Оличительной особенностью системы является высокая степень автоматизации сбора, накопления и обработки данных со всех узлов ускорителя, диагностика и контроль основных параметров пучка на основе обработки показаний датчиков как в статическом, так и в динамическом режимах.

В диссертационной работе, подробно исследован вопрос стабилизации амплитудно-фазовых характеристик СВЧ системы линейного ускорителя-инжектора, что является важным для обеспечения прецизионной работы

ускорителя в различных режимах: одно-суступочном, многосуступочном и в режиме непрерывного ввода частиц в накопитель.

Применена методика декомпозиции сингулярных значений для обработки данных датчиков положения пучка для прецизионной коррекции орбиты в накопителе электронов. Полученные результаты показывают, что примененная методика стабилизирует орбиту со среднеквадратичной точностью до 10 мкм.

Практическое значение. Полученные результаты по исследованию коррекции центральной траектории пучка и увеличению среднеквадратичного эмитанса пучка в линейных ускорителях для генерации ЛСЭ имеют важное практическое значение как с точки зрения выбора параметров фокусирующей системы ускорителя (длина периода, набег фазы), так и с точки зрения согласования параметров пучка с требованиями генерации ЛСЭ. Сохранение нормализованного эмитанса в ускорителе одно из важнейших условий и полученные результаты позволят избежать увеличения эмитанса при выборе и реализации системы коррекции центральной траектории пучка. Методическая важность полученных результатов связана с реальной оценкой эффектов накопления ошибок датчиков положения пучка, которые приводят к дрейфу центральной траектории. Предложенная методика многоступенчатой коррекции позволит стабилизировать центральную траекторию и, как следствие, избежать разбухания пучка на фазовой плоскости.

Результаты диссертационной работы по диагностике, коррекции и контролю параметров пучка в накопителях электронов позволят стабилизировать орбиту и параметры пучка с высокой точностью. Разработанная и смоделированная система контроля с обратной связью позволит оперативно реагировать на смещение параметров пучка и ускорителя от заданных значений, обеспечивая тем самым высокое качество фотонных пучков для пользователей. Подготовлен пакет программ для внедрения в систему контроля источников СИ.

Результаты работы были использованы при разработке проекта ускорителя ТЕСЛА для генерации ЛСЭ и проекта источника синхротронного излучения CANDLE.

Основные положения выносимые на защиту.

1. Результаты исследования среднеквадратичного дисперсионного эмитанса пучка при коррекции центральной траектории. Получено аналитическое выражение для увеличения эмитанса пучка и оценен дрейф центральной траектории при бездисперсионной коррекции.
2. Предложена многоступенчатая коррекция траектории для подавления накопления ошибок при минимизации разностной траектории. Проведено численное моделирование для проекта ТЕСЛА-ЛСЭ и европейского проекта СЛСЭ.

3. Разработана архитектура и функциональная схема системы диагностики, контроля и обратной связи для источника синхротронного излучения CANDLE. Смоделирована система синхронизации амплитудно-фазовых характеристик СВЧ системы линейного ускорителя при различных режимах работы ускорителя.
4. Исследована и смоделирована система коррекции и стабилизации орбиты ускорителя на основе метода сингулярной декомпозиции обратной матрицы отклика пучка. Результаты применены для коррекции орбиты в накопителе электронов проекта синхротронного источника CANDLE.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Shanghai Symposium on Intermediate Energy Light Sources, SSRC-01, Shanghai China, 24-26 September 2001.
2. European Particle Accelerator Conference, EPAC '02, Paris, France, 3-7 Jun, 2002.
3. "Физика-2003", Третье национальное научное собрание молодых физиков, ЕГУ, Ереван, Армения, 4-8 Ноябрь, 2003.
4. European Particle Accelerator Conference EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 5-9 July, 2004.
5. NATO Advanced Research Workshop "Advanced Photon Sources and Their Application", Nor Hamerd, Armenia, Aug 29 -Sept 02, 2004.
6. Particle Accelerator Conference, PAC'05, Knoxville, Tennessee, USA, 16-20 May, 2005

Публикации

По материалам работы опубликовано 14 научных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Личное участие автора в выполнении работы выразилось в проведении анализа и численного моделирования увеличения эмитанса пучка в линейных ускорителях при коррекции центральной траектории пучка, оценке эффекта накопления ошибок при коррекции траектории, величины дрейфа траектории и ее коррекции.

В разработке и моделировании архитектуры и функциональной системы диагностики, контроля и обратной связи для накопителя электронов CANDLE.

В численном моделировании системы синхронизации амплитудно-фазовых характеристик СВЧ системы линейного ускорителя.

В численном моделировании стабилизации орбиты ускорителя на основе метода сингулярной декомпозиции обратной матрицы отклика пучка.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 93 страниц, в том числе 40 рисунка, 14 таблиц и 77 литературных ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные задачи, поставленные и решенные в данной работе. Обоснована актуальность темы, научная новизна проделанной работы, цель работы и краткое описание способов решения поставленных задач. Также приведено краткое описание трех глав, включая основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследованы вопросы коррекции центральной траектории пучка в линейных ускорителях электронов для генерации ЛСЭ и эффекты дисперсионного увеличения эмитанса пучка.

Рассмотрена проблема коррекции возмущенной траектории пучка на основе информации от датчиков положения пучка, осуществляемая последовательно от линзы к линзе с помощью корректирующих магнитов. Предполагается, что фокусирующая система ускорителя представляет собой обычную симметричную периодическую ФДО структуру, и решение уравнения относительного смещения неравновесной частицы вдоль ускорителя представляется в виде суммы по ячейкам периодичности. Усредняя среднеквадратичное смещение неравновесной частицы по текущей фазе ϕ в пределах $[0, 2\pi]$, по начальному разбросу частиц по энергиям по положению центральной траектории и в квадрупольных линзах, получено следующее выражение для среднеквадратичного увеличения эмитанса пучка

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = 8\sigma_0^2 \frac{\langle x_c^2 \rangle \tan \mu / 2 \gamma_0}{\varepsilon_0 L_{cell} \Delta \gamma / \gamma_0}, \quad (1)$$

где $\langle x_c^2 \rangle = \sigma_q^2 + \sigma_b^2 + \sigma_r^2$, L_{cell} - длина ФДО ячейки периодичности, μ - набег фазы на период, ϕ_0 - начальный эмитанс пучка, $\Delta \gamma$ прирост энергии за период ФДО структуры.

Формула (1) дает ясную качественную зависимость дисперсионного уширения эмитанса пучка, как от фокусирующей системы ускорителя (набег фазы и длина ячейки периодичности) и темпа ускорения, так и среднеквадратичных погрешностей установки элементов вдоль ускорителя. Заметим, что для симметричной ФДО структуры, параметр $\xi = \tan \mu / 2$ определяет хроматичность фокусирующей системы, которая задает дополнительный набег фазы неравновесной частицы по отношению к равновесной частице. На фазовой плоскости поперечных колебаний, частицы большей энергией запаздывают по фазе, а частицы с меньшей энергией опережают по фазе равновесную частицу (рис 1).

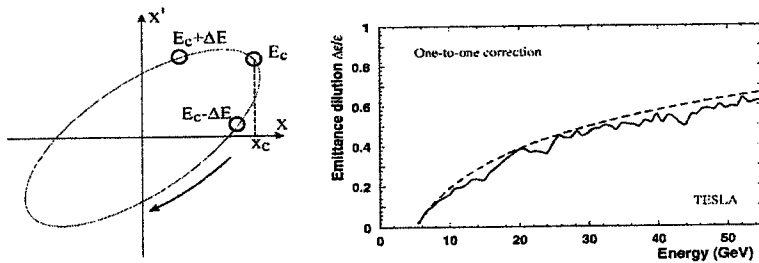


Рисунок 1. Дисперсионное уширение пучка на фазовой плоскости (x, x') из-за разброса частиц по энергиям (слева) и относительное увеличение эмитанса пучка в линейном ускорителе ТЕСЛА (справа).

На рис.1 представлена динамика частиц на фазовой плоскости (x, x') поперечных колебаний и результаты трека частиц в основном линейном ускорителе ТЕСЛА. Пунктирной линией показано среднее квадратичное увеличение эмитанса пучка вдоль ускорителя, предсказываемое формулой (1). Как видно из сравнения полученных результатов, усреднение по большому числу погрешностей дает хорошие согласие с аналитическим результатом.

Прямое следствие выражения (1): для подавления дисперсионного уширения эмитанса пучка необходимо уменьшить хроматичность фокусирующей системы переходом на более слабую фокусировку. Также отметим, что увеличение темпа ускорения Δu также приводит к уменьшению дисперсионного уширения эмитанса пучка, поскольку частицы с разной энергией не успевают разойтись на фазовой плоскости поперечных колебаний.

На рис. 2,3 представлены результаты трека частиц в линейном ускорителе проекта европейского источника СЛСЭ при наличии погрешностей установки квадрупольных линз. На рисунке показаны возмущенная траектория пучка без коррекции (пунктирная линия), и траектория пучка после коррекции центральной траектории на основе информации с датчиков положения пучка (сплошная линия).

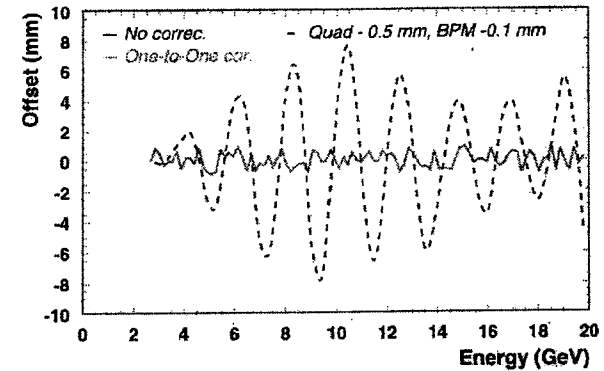


Рисунок 2. Траектории пучка и увеличение среднее квадратичного эмитанса в линейном ускорителе XFEL: возмущенная (пунктирная линия) и скорректированная (сплошная линия) центральные траектории.

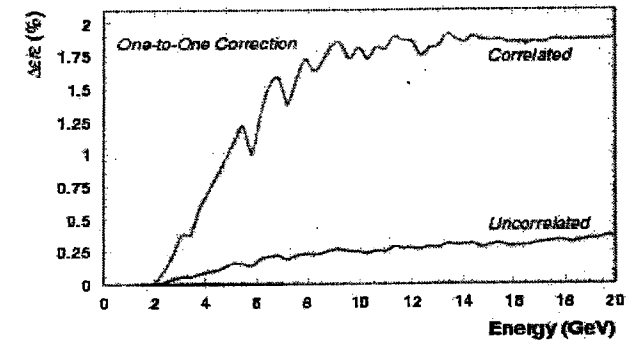


Рисунок 3. Коррелированное и некоррелированное дисперсионное увеличение эмитанса пучка в линейном ускорителе проекта XFEL.

Далее в этой главе исследован вопрос поперечного дрейфа орбиты пучка при бездисперсионной коррекции траектории в линейном ускорителе. Показано, что за счет накопления ошибок разрешимости датчиков положения пучка σ_y среднее квадратичный дрейф траектории вдоль ускорителя меняется с энергией, как $\sim \gamma^{3/2}$ (γ -Лоренц фактор частицы). На основе анализа эффектов поперечного дрейфа траектории, предложена монгоступенчатая коррекция траектории, которая позволяет предотвратить систематическое нарастание поперечного смещения центральной траектории.

В заключении первой главы приведены основные результаты:

- Исследовано дисперсионное увеличение эмитанса пучка в линейном ускорителе электронов при последовательной коррекции центральной траектории. Показано, что величина увеличения эмитанса прямо пропорциональна хроматичности фокусирующей системы, обратно пропорциональна темпу ускорения частиц и логарифмически возрастает с энергией частиц вдоль ускорителя.
- Численно исследовано увеличение эмитанса в проекте ТЕСЛА-ЛСЭ и европейского проекта СЛСЭ и получено хорошее согласие результатов с аналитическим описанием.
- Исследован поперечный дрейс траектории при бездисперсионной коррекции центральной траектории и предложена монгоступенчатая коррекция траектории.

Вторая глава посвящена разработке основных требований к системе контроля и диагностики параметров пучков в источниках синхротронного излучения. На основе анализа функционирующих систем контроля в ведущих центрах источников света предложены основные критерии проектирования, архитектуры и компонентов системы контроля для проекта источника синхротронного излучения CANDLE [6]. Основными требованиями к системе контроля являются удобство и простота использования, надежность, гибкость и возможность модификации аппаратного оборудования. Система контроля должна быть распределенной, иметь многоуровневую и модульную программную /аппаратную структуру, использовать стандартные компоненты. Программное обеспечение должно быть основано на объектно-ориентированной технологии. В этой главе так же приводится краткое описание основных методов определения значений энергии пучка, накопленного тока, бетатронных колебаний и поперечного профиля пучка. Определены основные подходы к диагностике положения пучка в режиме первого оборота, от оборота к обороту и в режиме усреднения по многим оборотам пучка в кольце. Специальный параграф этой главы посвящен вопросам численного моделирования диагностического канала синхротронного излучения, исследованию и трассировке фотонного пучка вдоль оптической структуры канала для определения профиля исходного электронного пучка [7,8]. В работе проведена трассировка электронного пучка вдоль оптической структуры для случая точечного источника и источника с гауссовским поперечным распределением. Как показали расчеты для точечного источника, разрешимость метода составляет порядка 1 мкм для определения поперечного распределения электронного пучка в кольце (рис. 4).

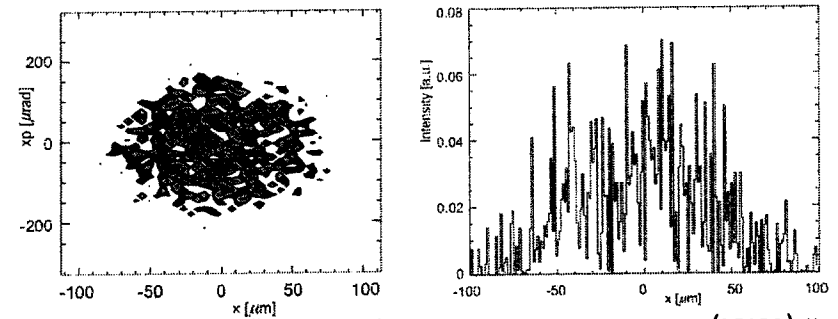


Рисунок 4. Фазовый портрет фотонного пучка на экране (слева) и распределение в поперечном сечении (справа) после трассировки фотонного пучка вдоль оптической структуры синхротронного канала.

Основные результаты данной главы приведены в заключении:

- Разработана архитектура системы контроля для CANDLE. Главными критериями для разработки являются распределенность и многоуровневая структура системы контроля, модульность аппаратного и программного обеспечения.
- Исследованы основные режимы работы установки CANDLE и разработаны методы хранения и обработки данных, встроенные в систему контроля.
- Численно смоделирован диагностический канал синхротронного излучения и проведена трассировка фотонов вдоль оптической структуры канала. Показано, что в области рентгеновских длин волн разрешимость составит порядка 1 мкм.

Третья глава посвящена методам стабилизации орбиты пучка и контроля основных параметров в источниках синхротронного излучения. Глава начинается с рассмотрения системы контроля для линака в 100 МэВ инжектора CANDLE. Важнейшей особенностью системы является высокая степень синхронизации амплитудно-фазовых характеристик отдельных узлов для обеспечения пространственно-энергетических характеристик ускоренного пучка электронов. Это налагает жесткие требования на стабильность и контроль частоты, амплитуды и фазы возбуждаемых СВЧ электромагнитных полей. В работе применен метод СВЧ анализа [9] основанный на MATLAB/SIMULINK, который позволяет моделировать и анализировать качество регулирования электрических полей в резонаторах для выбранной конфигурации линейного ускорителя. Результаты моделирования системы настройки пространственно-фазовых характеристик СВЧ полей показали, что выбранная конфигурация линейного ускорителя и системы СВЧ управления позволяют обеспечить требуемые параметры электронного пучка

на выходе из ускорителя [4]. Важным следствием проведенного исследования является стабильность параметров электронного пучка, обеспечиваемая в автономном режиме работы ускорителя на основе анализа данных и обратной связи.

В третьей главе также приведены результаты исследования вопросов стабилизации и коррекции орбиты пучка в накопителях электронов, и приведены результаты численного моделирования для накопителя CANDLE.

Стабильность орбиты в накопителе в основном зависит от смещений квадрупольных линз. Самый простой метод коррекции возмущенной траектории основывается на методе глобальной коррекции с использованием данных полученных от датчиков положения пучка, размещенных по всему кольцу, и корректоров. Для коррекции замкнутой орбиты в накопительном кольце применяется глобальная система обратной связи, которая доводит до минимума отклонения орбиты. Для глобальной коррекции орбиты выбирается набор корректоров и датчиков положения пучка, определяется матрица откликов, которая описывает изменение орбиты пучка при изменении тока в корректорах, т.е. $Y = R \times X$, где X , Y — вектора, элементами которых являются соответственно данные полученные от датчиков положения пучка и значения полей в корректорах, R — матрица откликов. Размерность вектора Y есть m и равна числу датчиков положения пучка, а размерность вектора X равна числу корректоров n . Размерность матрицы R — $m \times n$.

Однако, прямой метод коррекции орбиты с использованием матрицы откликов не всегда обеспечивает соответствующее исправление орбиты, так как матрица откликов часто бывает вырожденной, даже в том случае, когда число датчиков положения пучка намного больше числа корректоров. Из-за вырожденности невозможна однозначная инверсия, потому что встречаются комбинации значений сил корректирующих магнитов, которые обеспечивают очень малое или нулевое отклонение в датчиках положения пучка.

В работе применен метод декомпозиции сингулярных значений [10] для прецизионной коррекции возмущенной орбиты. В основе этого метода лежит известная из теории матриц теорема: любая $m \times n$ матрица, где $m \geq n$, может быть записана как произведение $m \times n$ матрицы U , $n \times n$ диагональной матрицы S , с положительными или нулевыми элементами σ_i (особые значения матрицы) и $n \times n$ ортогональной матрицы V^T

$$R = U \times S \times V^T, \quad (2)$$

В этом случае матрица, обратная от матрицы откликов будет

$$R^{-1} = V S^{-1} U^T = \sum_i \bar{v}_i \frac{1}{\sigma_i} \bar{u}_i^T, \quad (3)$$

Очевидно, что когда значения σ_i равны нулю или очень малы, тогда значения в R^{-1} или очень большие или стремятся к бесконечности, т.е. даже самые малые значения измеренной орбиты, вызванных шумами в

датчиках положения пучка, приведут к нежелательным изменениям токов в корректорах.

Очевидно, что когда значения σ_i равны нулю или очень малы тогда значения в R^{-1} или очень большие или стремятся к бесконечности, т.е. даже при самых малых значениях отклонения орбиты, вызванных шумами в датчиках положения пучка, результаты могут привести к нежелательным изменениям токов в корректорах. Проблема решается удалением из матрицы откликов всех элементов с малыми значениями σ_i . После этого можно применить приемлемые значения токов для корректировки траектории и эффективно отфильтровать шумы в датчиках положения пучка. Этот метод позволяет удерживать отклонения замкнутой орбиты в пределах меньше чем 10 мкм.

В диссертации приведены результаты разработанного графического интерфейса в среде MATLAB с использованием Accelerator Toolbox для моделирования контроля обратной связи для корректирования замкнутой орбиты. Интерфейс позволяет выбрать корректоры и датчики положения пучка, производит инверсию матрицы откликов с применением метода декомпозиции сингулярных значений. Программа позволяет исследовать матрицу откликов для выбранного набора корректоров и датчиков положения пучка, сингулярные значения этой матрицы, инверсную матрицу и траекторию пучка.

Методика декомпозиции сингулярных значений матрицы отклика была применена для разработки прецизионной коррекции орбиты в накопителе электронов CANDLE. На рис. 5 приведена схема одной ячейки периодичности магнитной системы накопителя CANDLE с встроенными датчиками положения пучка.

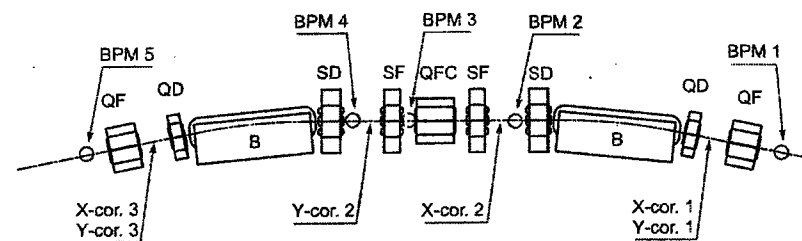


Рисунок 5. Период магнитной системы CANDLE со встроенными датчиками положения пучка.

При проведении численного моделирования предполагалось, что квадрупольные линзы кольца имеют статистически независимые отклонения от оси ускорителя со среднеквадратичным значением в 100 мкм. Для коррекции орбиты за оборот использовались данные возмущенной траектории в 80 датчиках положения пучка, а коррекция осуществлялась 48 горизонтальными и 48 вертикальными корректорами. На рис. 6 приведены матрица отклика (слева) и обратная матрица откликов (справа).

После анализа сингулярных значений обратной матрицы (рис.7), определяются силы корректоров для выравнивания орбиты пучка.

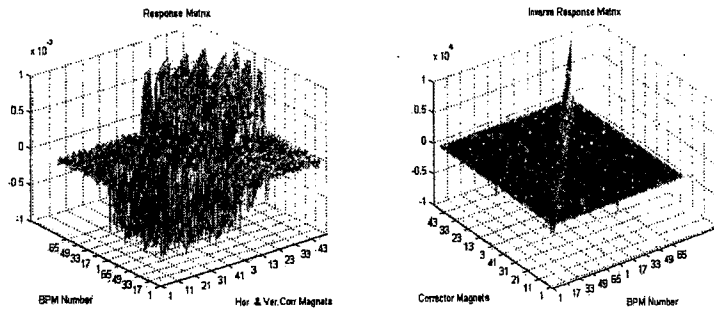


Рисунок 6. Матрица откликов (слева) и обратная матрица (справа) определенная для накопительного кольца CANDLE.

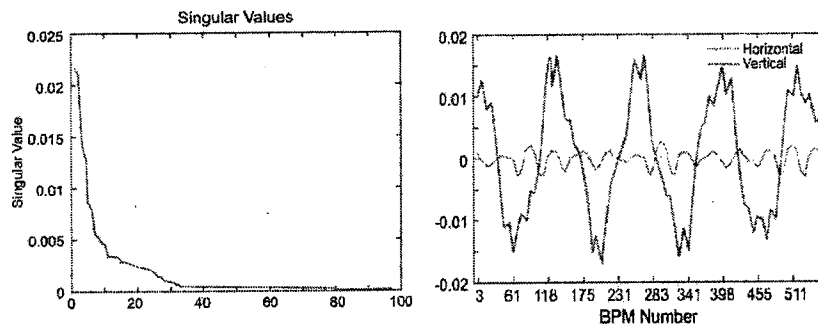


Рисунок 7. Сингулярные значения матрицы откликов (слева) и скорректированная траектория пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях (справа).

В заключении к третьей главе подытожены основные результаты главы:

- Разработана система СВЧ контроля для линейного ускорителя инжектора источника синхротронного излучения CANDLE.
- Исследован метод сингулярной декомпозиции матрицы отклика для коррекции орбиты в накопителях электронов и подготовлен пакет программ.

- Проведена коррекция возмущенной орбиты пучка на уровне 10 мкм в накопителе электронов CANDLE для случайных статистически независимых отклонений квадрупольных линз в кольце.

В заключении к диссертации приведены основные выводы:

1. Исследовано среднеквадратичное дисперсионное увеличение эмитанса пучка при коррекции центральной траектории в линейных ускорителях электронов. Получено аналитическое выражение для коррелированного и некоррелированного увеличения эмитанса пучка. Проведено численное моделирование для проекта ТЕСЛА-ЛСЭ и европейского проекта СЛСЭ.
2. Предложена многоступенчатая коррекция траектории для подавления накопления ошибок при минимизации разностной траектории.
3. Разработана архитектура и функциональная схема системы диагностики, контроля и обратной связи для источника синхротронного излучения CANDLE. Смоделирована система синхронизации амплитудно-фазовых характеристик СВЧ системы линейного ускорителя при различных режимах работы ускорителя.
4. Исследована и смоделирована система коррекции и стабилизации орбиты ускорителя на основе метода сингулярной декомпозиции обратной матрицы отклика пучка. Результаты применены для коррекции орбиты в накопителе электронов проекта синхротронного источника CANDLE.

Цитируемая литература

1. LCLS CDR, SLAC Report No. SLAC-R-593, 2002.
2. TESLA TDR, DESY Report No DESY-2001-011, 2001.
3. J. Corbett, T. Rabedeau, Synch. Rad. News 12, 22, 1999.
4. V. Tsakanov et al, Rev. Sci. Instrum. 73:1411-1413, 2002.
5. V. Tsakanov et al, CANDLE Design Report, ASLS-CANDLE R-02-001, 2002.
6. James A. Safronek, Beam-based Accelerator Modeling and Control, 9th Beam Instrumentation Workshop, Cambridge, AIP Conf. Proc. 2000.
7. A. Hofmann, Diagnostics with Synchrotron Radiation, CAS, Grenoble, CERN 98-04, August, 1998.
8. K. Potter, Beam Profiles, CAS, Paris, CERN 85-19, November, 1985.
9. A. Vardanyan, V. Ayvazyan, S.N. Simrock. "An Analysis tool for RF Control for Superconducting cavities". EPAC'02, Paris, 2002.
10. J. C. Nash, Compact Numerical Methods for Computers, (linear algebra and function minimization), New York, 1979.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. G. Amatuni, R. Brinkmann, M. Ivanian, V. Khachatryan, V. Tsakanov, Single Bunch Emittance Preservation in TESLA, DESY-TESLA-2001-02, 25pp. Feb 2001.
2. V. Tsakanov, G. Amatuni et al, Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission – A New Synchrotron Light Source Project in Armenia, Rev. Sci Instrum. 73: pp.1411-1413, 2002.
3. V. Avvazyan, G. Amatuni, A. Yayloyan, K. Rehlich, S. Simrock, Design of the CANDLE Control System, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, June 02-07, pp. 2001-2003, 2002.
4. G. Amatuni, A. Vardanyan, Linac RF Control System for CANDLE. Design and Simulation, Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, pp. 2254-2256, 2004.
5. G. Amatuni, A. Vardanyan, Study of the Multi-level EPICS Based Control System for CANDLE Light Source, Proc. of the Advanced Photon Sources and Their Applications Workshop, Nor-Hambard, Armenia, 2004, Kluwer Academic Publishers, pp. 411-414, 2005.
6. G. Amatuni, Yu. Martirosyan, R. Mikaelyan, V. Tsakanov, A. Vardanyan, Beam Orbit Diagnostics and Control in CANDLE Storage Ring, Proc. of Part. Accel. Conf. 2005, Knoxville, Tennessee, pp. 1655-1657, 2005.
7. S. Tunyan, G. Amatuni, B. Grigoryan, Temperature Regulation of the Accelerating Section in CANDLE Linac, Proc. of Part. Accel. Conf. 2005, Knoxville, Tennessee, pp.1416-1418, 2005.
8. S. Tunyan, G. Amatuni, V. Avagyan, Main Approaches to the Cooling System for the CANDLE Light Source, Proc. of the Workshop Advanced Photon Sources and Their Applications, Nor-Hambard, Armenia, 2004, Kluwer Academic Publishers, pp. 415- 420, 2005.
9. Г. Амадуни, Увеличение эмитанса пучка в линейных ускорителях при коррекции центральной траектории, ФИЗИКА, Известия национальной академии наук Армении, 40, №6, стр. 416-423, 2005.
10. V. Tsakanov, G. Amatuni et al, Armenian Light Source, CANDLE, Proc. of the Intern. Workshop on "Electron-Photon Interaction in Dense Media", Nor-Hambard, Armenia, 2001, Kluwer Academic Publishers, pp.331-348, 2002.
V. Tsakanov, G. Amatuni et al, Design Study of CANDLE Synchrotron Light Source, Symposium on Intermediate Energy Light Sources, Shanghai, China, SSRC 02-1, March 2002, pp. 37-41, 2002.

V. Tsakanov, G. Amatuni et al. Status of 3 GeV Intermediate Energy Light Source Project in Republic of Armenia, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, June 02-07, pp. 763-765, 2002.

V. Tsakanov, G. Amatuni et al. An Overview of CANDLE Synchrotron Light Facility, Proc. IV Nat. Conf. on Semiconductors, Tzakhkadzor, 29-31, May 2003, pp. 208-211, 2003

V. Tsakanov, G. Amatuni et al, Status of 3 GeV CANDLE Synchrotron Light Facility Project, Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, pp. 2254-2256, 2004

Ա մ փ ո փ ա գ ի ր

Ժամանակակից սինքրոտրոն ճառագայթման և ազատ էլեկտրոններով լազերների աղբյուրներում մեծ պայծառության փնջեր ունենալու համար անհրաժեշտ է արագացնել, կուտակել և ղեկավարել շատ փոքր էմիտանտով էլեկտրոնային փնջեր: Դրա համար պետք է կարողանալ շտկել փնջի հետագիծը, հսկել և ղեկավարել փնջի և արագացուցիչի հիմնական պարամետրերը, ունենալ մեծ ճշտություն ապահովող փնջի դիագնոստիկայի, հետադարձ կապի և ամբողջ կայանքի անխափան աշխատանքը ապահովող ղեկավարման համակարգեր: Առենախոսությունը նվիրված է վերոհիշյալ հարցերի ուսումնասիրությանը: Ներկայացված է ազատ էլեկտրոններով լազերների համար գծային արագացուցիչներում էլեկտրոնային փնջի թանձրուկի մաթեմատիկական մոդելը: Տրվել է գծային արագացուցիչում էլեկտրոնային փնջի էներգետիկ սփռվածության գնահատականը: Ներկայացված է գծային արագացուցիչում էլեկտրոնային փնջի հետագծի հաջորդական կոռեկցիայի մեթոդը: Տրված է գծային արագացուցիչում փնջի էմիտանտի մեծացման անալիտիկ գնահատականը երկու տարբեր էներգիաներով լիցքերի մոդելի համար հաջորդական կոռեկցիայի ժամանակ: Թվային մեթոդներով գնահատվել է փնջի էմիտանտի աճը XFEL նախագծի համար: Լիոյունքները համեմատվել են անալիտիկ լուծման հետ: Ներկայացված է գծային արագացուցիչներում էլեկտրոնային փնջի հետագծի առանց դիսպերսիայի կոռեկցիայի մեթոդը: Կոռեկցիայի այդ մեթոդով ստացվող հետագծի դրեյֆի միջին քառակուսային արժեքի համար տրվել է գնահատական: Ելնելով ստացված արդյունքից առաջարկվել է նոր մեթոդ՝ բազմափուլ կոռեկցիա, որի կիրառությունը մի քանի անգամ կփոքրացնի հետագծի դրեյֆը: Աինքրոտրոն ճառագայթման աղբյուրների ղեկավարման համար մշակվել է ճկուն, օգտագործման տեսակետից շատ պարզ և կայանքի անխափան աշխատանքը ապահովող համակարգ: Ներկայացված է նաև CANDLE սինքրոտրոն ճառագայթման աղբյուրի համար մշակված դիագնոստիկ բիմլայնը: Նկարագրված է XOP/Shadow VU ծրագրի միջոցով մոդելավորված բիմլայնը և ամփոփված են ստացված հիմնական արդյունքները: Ներկայացված է CANDLE լույսի աղբյուրի գծային արագացուցիչը, դրա ղեկավարման համակարգի սխեման: Ներկայացված են դիֆերենցիալ հավասարումները, որոնք միանշանակ բնութագրում են գծային արագացուցիչ երեք հիմնական ռեզոնատորների ԲԳ համակարգը: Նկարագրված է այդ ռեզոնատորներում ԲԳՀ ամպլիտուդի և ֆազայի ղեկավարման և հակադարձ կապի համակարգերը: Ներկայացված են ստացված ճշտությունները ամպլիտուդի և ֆազայի արժեքների համար: Այս գլխում ներկայացված է նաև CANDLE լույսի աղբյուրի կուտակիչ օղակում էլեկտրոնային փնջի փակ հետագծի կոռեկցիայի ալգորիթմը: Կուտակիչի երկայնքով տեղակայված փնջի դիրքը որոշող սարքերի (BPM) և կոռեկտոր դիպոլների (CD) ցուցմունքների

հիման վրա կազմվում է արձագանքի R մատրիցան: R մատրիցայի ոչ էլեմենտը դա J – բորդ CD –ում փոփոխությանը համապատասխանող արձագանքն է i – բորդ BPM –ում: Առաջարկված է այս մատրիցայի հակադարձ մատրիցան որոշել SVD մեթոդի միջոցով: Այս մեթոդի առավելությունը նրանում է, որ միանգամից անտեսվում են այն CD–ները, որոնց արձագանքները համապատասխան BPM–ներում կամ գրո են կամ անջափ փոքր են: Այս մեթոդով փնջի ուղեծիրը ուղղվում է 10 միկրոն ճշտությամբ: Կատարված աշխատանքի արդյունքների մի մասը հաջողությամբ կիրառվել է TESLA-FEL և European XFEL նախագծերում:

Աննա Երևան