

На правах рукописи

ГЕТМАНОВ Ярослав Владимирович

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В МНОГОПРОХОДНОМ УСКОРИТЕЛЕ-РЕКУПЕРАТОРЕ
ДЛЯ СВЕРХЪЯРКОГО ИСТОЧНИКА СИ
ЧЕТВЁРТОГО ПОКОЛЕНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2016

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ВИНОКУРОВ
Николай Александрович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

РОЯК
Михаил Эммануилович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, профессор кафедры прикладной математики

ФОМИН
Евгений Александрович – кандидат физико-математических наук, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва, заместитель начальника лаборатории.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится « 27 » декабря 2016 г. в « 10:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

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 СО РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Последнее десятилетие широко обсуждаются проекты источников синхротронного излучения (СИ) четвёртого поколения. Основные требования, предъявляемые к излучению следующие: полная пространственная когерентность, высокая средняя яркость, высокая пиковая яркость и др. Кроме того, на источнике должно одновременно работать большое количество экспериментальных групп.

Ускорители-рекуператоры (УР) призваны объединить преимущества электронных накопителей и линейных ускорителей – высокий средний электронный ток, малый эмиттанс электронного пучка, радиационную безопасность. Повышение энергетической эффективности достигается использованием многопроходной схемы, впервые реализованной на новосибирском лазере на свободных электронах (ЛСЭ). Различные варианты источника СИ четвёртого поколения с длиной волны 0.1 нм на базе многооборотного УР MARS (multiturn accelerator-recuperator source) обсуждаются с 1998 года. Другим перспективным проектом, обсуждаемым в настоящее время, является высокомоощный ЛСЭ с длиной волны излучения 13.5 нм для промышленного использования в литографии. Используемые в проектах схемы многооборотных УР имеют разделённые ускоряющие структуры, позволяющие разводить ускоряемые и замедляемые электронные сгустки по различным траекториям в поворотных арках.

Одной из проблем получения высокомоощного излучения ЛСЭ является задача получения высокого среднего электронного тока в УР со сверхпроводящей ускоряющей структурой. Из-за высокой добротности высокочастотных (ВЧ) сверхпроводящих резонаторов слабозатухающие наведённые напряжения могут послужить причиной развития неустойчивостей. Наибольшими добротностями в ВЧ резонаторе обладают основная и дипольные моды, отклоняющие электроны в соответственно продольном и поперечном направлениях. Принцип развития неустойчивостей для обоих случаев одинаков – малое наведённое напряжение меняет импульс электронов, а при следующих проходах через резонатор смещение сгустка, вызванное этим изменением импульса, усиливает возмущение напряжения. Для нахождения областей оптимальных параметров электронно-оптической системы, определяющих высокое значение поперечного порогового тока, необходимо рассмотреть влияние всех дипольных мод резонаторов ускоряющей системы. Продольная неустойчивость возникает в неизохронных структурах при необходимости дополнительной догруппировки электронных пучков, например, в случае использования нескольких ондуляторов в поворотных арках УР. Так как снижение добротности основной моды нецелесообразно, необходима оптимизация фаз ускорения и параметров резонаторов.

Основные цели работы

В работе рассматриваются вопросы создания источников сверхъяркого излучения четвёртого поколения и источников излучения для промышленной литографии на основе УР с высоким средним электронным током. Целями работы являются определение основных физических ограничений, перспективных схем компоновки УР, критериев устойчивости и областей оптимальных параметров для предельных пороговых токов продольных и поперечных неустойчивостей в случае многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой. Для этого предполагается решить следующие задачи для двух случаев – источника излучения четвертого поколения «MARS» и компактной установки для промышленной литографии.

1. На основе требований, выработанных мировым научным сообществом к источнику излучения четвёртого поколения, определить основные физические ограничения, предъявляемые к ускорителю заряженных частиц.

2. Определить оптимальные схемы УР для источника излучения четвертого поколения и компактной установки для промышленной литографии.

3. Для увеличения предельного порогового тока поперечной неустойчивости, вызванной взаимодействием электронных сгустков и дипольных мод каждого сверхпроводящего резонатора ускоряющих структур, найти области оптимального набега бетатронных фаз на поворотных арках, разделяющих ускоряющие структуры многопроходного УР. Эту задачу можно разделить на несколько пунктов:

3.1. создание модели электронной оптики ускоряющих промежутков в специализированной программе и оптимизация бетатронных функций нормированных на релятивистский фактор на влётах в резонаторы;

3.2. определение минимального значения порогового тока для всех дипольных мод резонаторов ускоряющей структуры с помощью расчёта набора бетатронных фаз в поворотных арках по приближённой формуле и нахождение области параметров с максимальной величиной этого минимального порогового тока;

3.3. проведение численного моделирования для полученной области параметров электронно-оптической системы ускорителя.

4. Аналитически определить критерии устойчивости продольного движения и значение предельного порогового тока продольной неустойчивости, вызванной взаимодействием электронного тока и основной ускоряющей моды ВЧ резонаторов.

5. Провести численное моделирование взаимодействия электронных сгустков и ускоряющих структур многопроходного УР для проверки аналитических критериев устойчивости и значений пороговых токов.

Научная новизна. Автором работы впервые предложен метод увеличения значений порогового тока поперечной неустойчивости с помощью определения областей оптимальных параметров электронно-оптической структуры по зависимости предельного тока от независимого набора бетатронных фаз на трёх поворотных арках многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой.

Впервые выведены условия устойчивости продольного движения при взаимодействии заряженных частиц и фундаментальной ускоряющей моды ВЧ резонаторов многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой. Это сделано с помощью критерия Льенара-Шипара для матрицы проводимости, характеризующей параметры ускоряющей системы и электронного тока в приближении эквивалентного контура.

Практическая ценность результатов работы. В работе исследованы требования, физические ограничения и схемы многооборотных УР для создания источника излучения четвертого поколения и компактной установки для рентгеновской литографии. Разработанные методы позволяют оптимизировать электронно-оптическую и ВЧ ускоряющую структуры для увеличения значения пороговых токов неустойчивостей, вызванных взаимодействием электронных пучков и ВЧ резонаторов. Эти методы также могут быть использованы и для других конфигураций УР. Проведённые исследования могут быть использованы при создании новых источников излучения на базе УР.

Автор выносит на защиту следующие результаты работы:

1. Исследованы физические ограничения и схемы УР для создания сверхъяркого источника СИ четвертого поколения и источника рентгеновского излучения для промышленной литографии.

2. На основе теоретического анализа и численного моделирования рассмотрены способы повышения порогового тока поперечных неустойчивостей, вызванных взаимодействием электронных пучков и дипольных мод ВЧ резонаторов. Определены области оптимальных параметров электронно-оптической структуры многооборотного УР для создания сверхъяркого источника СИ четвертого поколения и источника рентгеновского излучения для промышленной литографии, обеспечивающие высокий пороговый ток.

3. Получены критерии устойчивости продольного движения и определён предельный пороговый ток продольной неустойчивости, вызванной взаимодействием электронного пучка и основной ускоряющей моды ВЧ резонаторов, для случая многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой.

4. С помощью теоретического анализа и численного моделирования определены области оптимальных фаз ускорения и торможения электронов, обеспечивающих высокий пороговый ток продольной неустойчивости, в

многооборотном УР с разделённой ускоряющей структурой для создания сверхъяркого источника СИ четвертого поколения и источника рентгеновского излучения для промышленной литографии.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Текст диссертации содержит 106 страниц, 84 рисунка, 8 таблиц. Список литературы состоит из 106 работ.

Апробация диссертационной работы. Основные результаты, представленные в данной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях, семинарах и рабочих собраниях: IPAC-2011, 2013, RuPAC-2012, ERL-2011, 2013, Sarantsev-2015, а также на научном семинаре в ИЯФ СО РАН (Новосибирск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, из них 4 в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК [1-4], и 1 патент [5].

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, сформулированы основные цели работы, а также в сжатой форме изложено содержание отдельных глав.

Первая глава носит вводный характер. В ней рассматриваются необходимые требования к источникам синхротронного излучения четвёртого поколения. Обсуждаются вопросы применимости различных типов ускорителей заряженных частиц для достижения необходимых параметров излучения. Приведены основные физические ограничения качества электронного пучка и параметров установки. Кратко изложены принципы работы ускорителя-рекуператора и многооборотного УР. Кратко обозначены проблемы при достижении высокого электронного тока в сверхпроводящих ускоряющих структурах.

Мировое научное сообщество разработало следующие требования к параметрам источника излучения нового поколения: полная пространственная когерентность; максимально достижимая временная когерентность ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$) без дополнительной монохроматизации; средняя яркость источника должна превышать $10^{23}-10^{24}$ фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ($\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$) $^{-1}$ поток фотонов из источника СИ четвертого поколения должен быть на уровне потока из источников третьего поколения; для ряда экспериментов требуется высокая пиковая яркость $\sim 10^{33}$ фотон $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$ ($\Delta\lambda/\lambda = 0.1\%$) $^{-1}$; длина электронного сгустка до 1 пс, а при использовании специальной техники – короче 100 фс; высокая долговременная стабильность; генерация линейно и циркулярно поляризованного излучения с быстрым

переключением типа и знака поляризации; постоянный тепловой поток на вакуумные камеры и оптику; одновременное обслуживание большого количества экспериментальных групп.

Невозможно удовлетворить все требования, предъявляемые к источникам рентгеновского излучения четвёртого поколения, используя только один вид источников. Высокую пиковую яркость и фемтосекундную длительность импульсов излучения можно получать, используя рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) на основе линейного ускорителя с высоким импульсным током. Классические схемы источников излучения на базе электронных накопителей имеют физические ограничения эмиттанса электронного пучка. УРы призваны объединить преимущества двух рассмотренных типов ускорителей – высокий средний ток накопителя и малый эмиттанс линейного ускорителя (см. рисунок 1).

Во время экспериментов со сверхпроводящими УР наблюдались явления «срыва» электронного тока при достижении им определённых значений. Принцип развития неустойчивости следующий (см. рисунок 2): пучок электронов, при пролёте ВЧ резонатора с возмущённым э/м полем получает дополнительный импульс; из-за ненулевого коэффициента связи между отклонением импульса и соответствующей координатой, электроны при возвращении в резонатор могут усилить возмущение поля. В работе рассматриваются неустойчивости продольного и поперечного движений в случае многократного прохождения ВЧ резонаторов многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой.

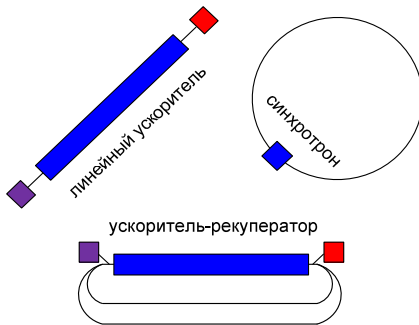


Рисунок 1. УР как объединение двух типов ускорителей.

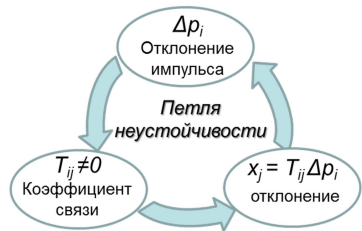


Рисунок 2. Петля неустойчивости.

Во второй главе рассматриваются варианты структур многооборотных УР. Представлен расчёт параметров проектов на базе многооборотных УР - источника СИ четвёртого поколения «MARS» и компактного рентгеновского лазера для промышленных целей. Рассматривается взаимодействие электронного пучка и поперечных мод сверхпроводящего ВЧ резонатора. Проведена оптимизация электронно-оптической системы УР для определения областей параметров с

максимальным пороговым током. Определены параметры ВЧ резонаторов, необходимых для достижения высокого среднего тока ускорителя.

Большинство требований к источнику СИ четвёртого поколения, перечисленных в главе 1, легче и дешевле удовлетворить с помощью многооборотных УР. Кроме того, такая схема ускорения выглядит перспективно для создания компактного высокоомощного рентгеновского источника излучения для литографии. Опыт работы на единственном многооборотном УР (Новосибирский ЛСЭ) показал, что схема с одним ускоряющим промежуток обладает некоторыми недостатками – ускоряемый и замедляемый пучки движутся по одним и тем же дорожкам, осложняя настройку электронной оптики машины. Поэтому, была предложена схема с разделённой ускоряющей структурой (см. рисунок 3).

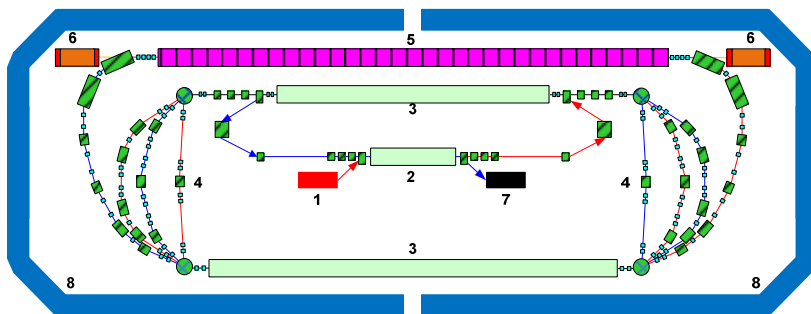


Рисунок 3. Схема ускорителя-рекуператора: 1 – инжектор; 2 - структура для предварительного ускорения; 3 – основные ускоряющие структуры; 4 – магнитная система; 5 – ондулятор; 6 – оптический резонатор; 7 – поглотитель; 8 – защитные стены зала.

В этом случае ускоряемые и замедляемые пучки с разным энергетическим разбросом движутся по разным дорожкам, что, кроме улучшения возможностей настройки магнитной системы, даёт возможность установки дополнительных ондуляторов в поворотные арки (см. рисунок 4). Оценочные стоимости установок с разделённой/неразделённой ускоряющими структурами сопоставимы при использовании магнитной структуры с небольшим (до восьми) числом ставосьмидесятиградусных поворотных арок.

В ускоряющей структуре установки предполагается использовать многоячеечные сверхпроводящие резонаторы. В каждом таком резонаторе могут возбуждаться долгоживущие (высокодобротные) дипольные моды электромагнитного поля. Для каждой дипольной моды можно вычислить пороговый ток в ультрарелятивистском многооборотном одномодовом однорезонаторном приближении

$$I_{th} = -2 \frac{m_0 c^3}{e} \frac{1}{\omega_m \left(\frac{R_{sh}}{Q} \right)_m \sum_{k=1}^{2N-1} \sum_{n=k+1}^{2N} M_{12}^{kn} \sin(\omega_m (T_n - T_k))}, \quad (1)$$

где c , m_0 , e – скорость света, масса и заряд электрона, ω_m , $R_{sh,m}$, Q_m – частота, шунтовой импеданс и добротность дипольной моды с номером m , M_{12}^{kn} – элемент транспортной матрицы между k -м и n -м пролётами резонатора, T_n – время n -го пролёта через резонатор. Для исключения взаимного влияния дипольных мод, необходимо их разделение по частоте на расстояние, большее, чем их полуширина.

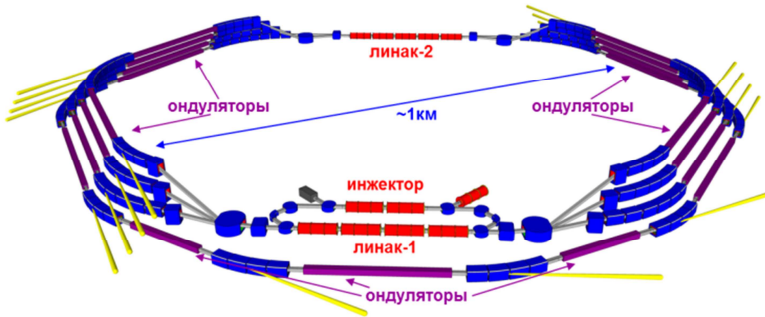


Рисунок 4. Схема проекта многооборотного УР MARS.

В работе проводилась оптимизация параметров электронно-оптической системы ускорителя для нахождения областей с максимальным значением порогового тока для всех мод резонаторов ускоряющей структуры. Сначала в программе Elegant оптимизировалась электронная оптика ускоряющих промежутков с учётом зеркальной симметрии оптических функций при торможении с задачей минимизации нормализованных на релятивистский фактор бетатронных функций. Параметры добротности и волнового сопротивления всех дипольных мод считались равными ($Q=10^5$, $\rho=100$ Ом), а для собственных частот генерировалось неперекрывающееся распределение на основе характеристик резонаторов Tesla с шагом 1 МГц. По формуле (1) вычислялась зависимость минимального значения порогового тока ускоряющей структуры (всех мод всех резонаторов) от набега бетатронных фаз на трёх оборотных арках (см. рисунок 5). В ней выделялись области устойчивости с наибольшим пороговым током. В полученном диапазоне проводилось численное моделирование в программе VI (см. рисунок 6). В результате оптимизации были определены параметры ВЧ резонаторов и получены области устойчивости с пороговым током, превышающим 100 мА для двух проектов источников излучения (MARS и промышленной литографии).

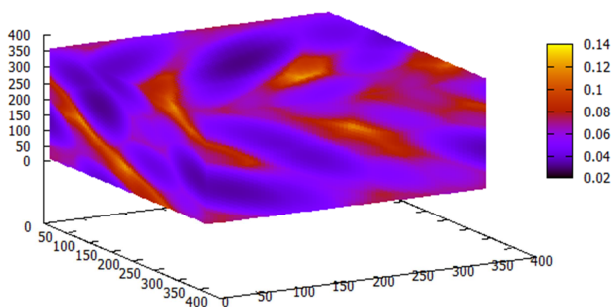


Рисунок 5. Расчёт для проекта источника СИ MARS. Пороговый ток, A , в зависимости от набора бетатронных фаз, град.

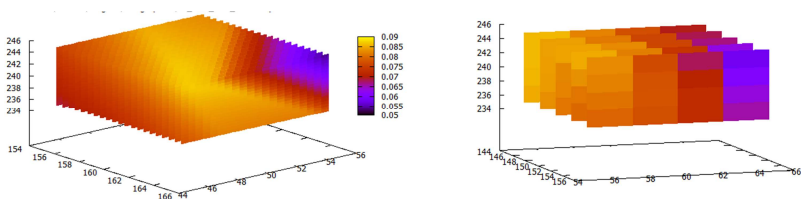


Рисунок 6. Области устойчивости, полученные теоретически (слева) и численным моделированием (справа). По осям – набор бетатронных фаз, цветом обозначен пороговый ток, A .

В третьей главе обсуждаются проблемы взаимодействия электронного тока и основной ускоряющей моды. Проведены теоретические оценки пороговых ограничений тока электронного пучка в случае однооборотного УР и многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой. Результаты теоретических выкладок подтверждаются численным моделированием в написанной программе расчёта наведённых полей с помощью «вэйк»-функций в приближении коротких сгустков.

Использование неизохронной электронно-оптической структуры, являющейся причиной возникновения эффекта продольной неустойчивости, вызвано необходимостью дополнительной группировки электронных сгустков. Так как между резонаторами одной ускоряющей структуры продольная дисперсия равна нулю, то для определения условий устойчивости можно использовать однорезонаторное приближение для каждого линейного ускорителя с преобразованными параметрами.

ВЧ резонатор представляется в виде эквивалентного контура с сосредоточенными параметрами, а электронный и генераторный токи – в виде источников тока (см. рисунок 7). Для определения условия устойчивости при взаимодействии электронного тока и ВЧ структуры

используется теория возмущений. В случае многооборотного УР через каждый линейный ускоритель проходит одновременно четыре типа пучков – два ускоряемых и два замедляемых. Из-за условий рекуперации, сумма напряжений, наводимых этими токами, в среднем равняется нулю (см. рисунок 8). При этом небольшие отклонения напряжения могут нарастать из-за неизохронности магнитной системы.

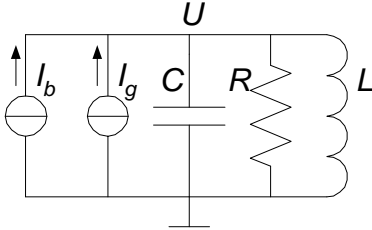


Рисунок 7. Эквивалентная схема ВЧ-резонатора.

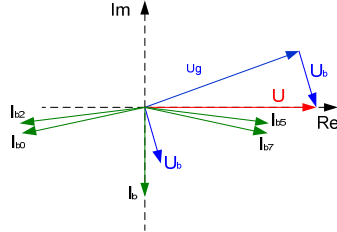


Рисунок 8. Фазоры токов пучка и напряжений в первой ускоряющей структуре.

Изменение напряжения U в этом приближении на каждом линейном ускорителе с номером α (в случае, когда время затухания Q/ω много больше, чем время пролёта через ускоритель) описывается формулой

$$\frac{2}{\omega} \frac{dU_\alpha}{dt} = \frac{i\xi_\alpha - 1}{Q} U_\alpha + \rho_\alpha (I_{b\alpha} + I_{g\alpha}), \quad (2)$$

где ω , ξ , ρ , Q – частота основной моды, расстройка, волновое сопротивление и добротность эквивалентного резонатора, I_b и I_g – средние токи электронного пучка и генератора. Используя теорию возмущений около стационарного значения напряжения

$$U_{0\alpha} = \frac{R_\alpha}{1 - i\xi_\alpha} [I_{b\alpha} (U_{0\alpha}) + I_{g\alpha}], \quad (3)$$

можно получить систему уравнений для возмущений напряжений

$$\frac{2}{\omega} \frac{d\delta U_\alpha}{dt} = \frac{i\xi_\alpha - 1}{Q_\alpha} \delta U_\alpha + \rho_\alpha \sum_\beta \left(\frac{\partial I_{b\alpha}}{\partial \text{Re} U_\beta} \text{Re} \delta U_\beta + \frac{\partial I_{b\alpha}}{\partial \text{Im} U_\beta} \text{Im} \delta U_\beta \right). \quad (4)$$

Предполагая экспоненциальное решение $\exp(i\omega t/2)$ для системы линейных дифференциальных уравнений (4) можно найти условия устойчивости. Система (4) соответствует системе линейных однородных уравнений $\lambda \delta \mathbf{U} = \mathbf{M} \delta \mathbf{U}$ с условием разрешимости $|\mathbf{M} - \lambda \mathbf{E}| = 0$. В случае многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой, матрица \mathbf{M} имеет вид

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b1}}{\partial \operatorname{Re} U_1} - \frac{1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b1}}{\partial \operatorname{Im} U_1} - \frac{\xi_1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b1}}{\partial \operatorname{Re} U_2} & \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b1}}{\partial \operatorname{Im} U_2} \\ \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b1}}{\partial \operatorname{Re} U_1} + \frac{\xi_1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b1}}{\partial \operatorname{Im} U_1} - \frac{1}{Q_1} & \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b1}}{\partial \operatorname{Re} U_2} & \rho_1 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b1}}{\partial \operatorname{Im} U_2} \\ \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b2}}{\partial \operatorname{Re} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b2}}{\partial \operatorname{Im} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b2}}{\partial \operatorname{Re} U_2} - \frac{1}{Q_2} & \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Re} I_{b2}}{\partial \operatorname{Im} U_2} - \frac{\xi_2}{Q_2} \\ \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b2}}{\partial \operatorname{Re} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b2}}{\partial \operatorname{Im} U_1} & \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b2}}{\partial \operatorname{Re} U_2} + \frac{\xi_2}{Q_2} & \rho_2 \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b2}}{\partial \operatorname{Im} U_2} - \frac{1}{Q_2} \end{pmatrix} \quad (5)$$

с характеристическим уравнением

$$\lambda^4 - S_1 \lambda^3 + S_2 \lambda^2 - S_3 \lambda + S_4 = 0. \quad (6)$$

Необходимые и достаточные условия устойчивости – отрицательной действительной части собственных чисел, даются критерием Льенара-Шипара. Он состоит в положительности коэффициентов полинома (6) и третьего минора Гурвица:

$$S_1 < 0, S_2 > 0, S_4 > 0, \Delta_3 = S_1(S_2 S_3 - S_1 S_4) - S_3^2 > 0. \quad (7)$$

Существуют такие значения расстроек ВЧ резонаторов ξ_1 и ξ_2 , что единственное независимое от них условие дает значение порогового тока неустойчивости

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \operatorname{Re} I_{b1}}{\partial \operatorname{Re} U_1} + \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b1}}{\partial \operatorname{Im} U_1} \right) + \rho_2 \left(\frac{\partial \operatorname{Re} I_{b2}}{\partial \operatorname{Re} U_2} + \frac{\partial \operatorname{Im} I_{b2}}{\partial \operatorname{Im} U_2} \right) < \frac{2}{Q_1} + \frac{2}{Q_2}. \quad (8)$$

В случае одинаковых фаз ускорения $\Phi_{1,2}$ для двух линейных ускорителей, неравенство (8) определяет пороговый ток

$$I_{th} = \frac{1/Q_1 + 1/Q_2}{e \rho_1 \sin(2\Phi_1) \sum_{n=0}^{Na-1} \sum_{k=0}^{Na-1} S_{4Na-2n-1,2k} + e \rho_2 \sin(2\Phi_2) \sum_{n=0}^{Na-1} \sum_{k=0}^{Na-1} S_{4Na-2n-2,2k+1}}, \quad (9)$$

где $Na = 2$ – количество ускорений в каждой структуре, $S_{n,k}$ – значение функции продольной дисперсии между n -м и k -м пролётами эквивалентного резонатора. Эффекты продольной и поперечной неустойчивости имеют схожий механизм развития, и соответственно выражения для пороговых токов (1) и (9).

Для проверки теоретических результатов была написана программа для расчёта наводимых напряжений с помощью «вэйк»-функций. Короткий сгусток с зарядом q будет наводить дополнительное напряжение

$$V_{||}(t) = q \frac{\omega_r R_s}{2Q} \cos(\omega_r t) \exp(-\frac{\omega_r}{2Q} t) H(t), \quad (10)$$

(R_s и Q – шунтовой импеданс и добротность эквивалентного резонатора, $H(t)$ – функция Хэвисайда) с частотой ω_r , отличающейся, при наличии расстройки, от частоты генератора.

В расчётах так же использовалось однорезонаторное приближение для каждой ускоряющей структуры. Изначально структура «заполнялась» пучками без отклонений по энергии и фазе. Каждый промежуток времени, равный периоду инжекции сгустков, складывались напряжения, наводимые на эквивалентные резонаторы, и пересчитывались отклонения электронных сгустков согласно рекуррентным уравнениям движения. После этого, в систему инжектировался следующий сгусток, а последний выбрасывался.

Теоретические условия устойчивости ускорителя определяются относительно самосогласованных стабильных фаз и напряжений, которые, вообще говоря, отличаются от начальных задаваемых фаз. Поэтому вводилось эффективное напряжение генератора, учитывающее эффект самосогласованности, (второе слагаемое) и отклонение наводимого напряжения от стабильного равняется

$$\Delta W = \sum_{i=1}^4 W(\varphi_i + \delta\varphi_i) - \sum_{i=1}^4 W(\varphi_i), \quad (11)$$

где $W(\varphi_i)$ - напряжение, наводимое пучком, влетающим с фазой φ_i , $\delta\varphi_i$ – отклонение пучка от равновесной фазы. В этом случае, отклонения фаз и напряжений будут рассчитываться относительно начального задаваемого значения.

Для проверки программы рассматривался однооборотный УР. Матрица проводимости (5) в случае однооборотного УР имеет размерность 2×2

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{Q} + 2I_0 e \omega \rho \left(\frac{dt}{dE} \right) \cos(\varphi_0) \sin(\varphi_1) & -\frac{\xi}{Q} - 2I_0 e \omega \rho \left(\frac{dt}{dE} \right) \sin(\varphi_0) \sin(\varphi_1) \\ \frac{\xi}{Q} - 2I_0 e \omega \rho \left(\frac{dt}{dE} \right) \cos(\varphi_0) \cos(\varphi_1) & -\frac{1}{Q} + 2I_0 e \omega \rho \left(\frac{dt}{dE} \right) \sin(\varphi_0) \cos(\varphi_1) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где φ_0 и φ_1 – фазы ускорения и торможения, I_0 – электронный ток, dt/dE – продольная дисперсия. На рисунке 9 представлена зависимость напряжения, наводимого на резонатор, от времени. Огибающая кривая и кривая аппроксимации получены из собственных чисел матрицы проводимости (12).

В случае многооборотного УР с разделённой ускоряющей структурой, динамика наведённого напряжения определяется четырьмя собственными числами матрицы (5). Рисунок 9 показывает пример зависимости напряжения от времени в области высокого порогового тока в случае УР MARS. Параметры УР MARS и компактного УР для промышленной литографии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры многооборотных УР.

Параметр	MARS	Лит. УР
Максимальная энергия, ГэВ	5.6	0.8
Ускоряющие структуры, МэВ	800 / 1800	100 / 275
Добротность основной моды	10^6	10^6
Волновое сопротивление, кОм	40 / 90	5 / 13.75
Диапазон расстроек резонаторов	$-10^3 - 10^3$	$-10^3 - 10^3$
R ₅₆ симм. / несимм. арок, м	1 / 2	1 / 2

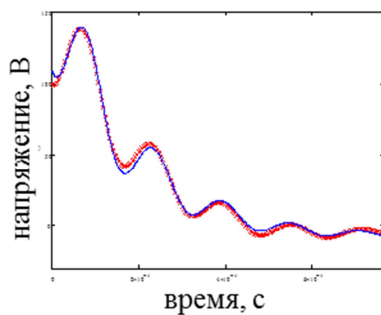
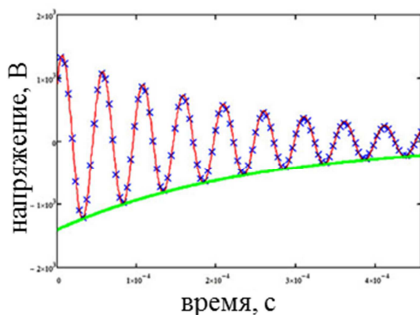


Рисунок 9. Зависимость наводимого напряжения от времени. Слева – однооборотный УР, справа – многооборотный УР. Численное моделирование и аппроксимация аналитической функцией.

Сравнения результатов теоретического расчёта и численного моделирования показаны на рисунке 10. Фазы ускорения считались равными для обоих линейных ускорителей. В областях устойчивости с неограниченным теоретически предельным током численное моделирование показывает так же высокий порог 200 мА для УР MARS и 55 мА для литографического УР.

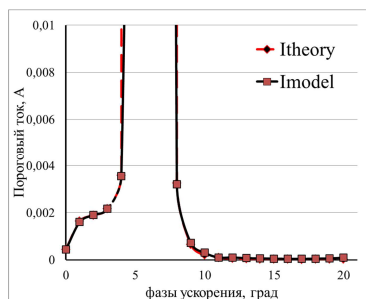
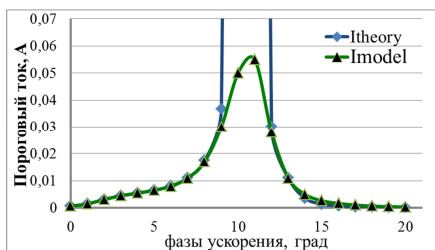


Рисунок 10. Зависимость порогового тока от фазы ускорения (все фазы равны). Слева – УР для литографии, справа – MARS. Сравнение пороговых токов, полученных из теории и численных симуляций.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Getmanov Ya.V. et al. Full spatial coherent multiturn ERL x-ray source (MARS) based on two linacs // Bristol: IOP Publishing – Journal of Physics: Conference Series – 2013 – 4 P.
2. Кулипанов Г. Н., ... Гетманов Я.В. Источник рентгеновского излучения на базе многооборотного ускорителя-рекуператора (МАРС) // Научный вестник НГТУ – 2013 – С. 112-118.
3. Гетманов Я.В. и др. "Продольная устойчивость в ускорителе-рекуператоре с двумя ускоряющими структурами" // Научный вестник НГТУ – 2013 – С. 119-127.
4. Kulipanov G.N., ... Getmanov Ya.V. et al. Novosibirsk free electron laser: Facility description and recent experiments // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology – vol.5 – iss.5 – pp. 798-809.
5. Пат. 2426282 С1 РФ. Многооборотный ускоритель-рекуператор / Винокуров Н.А., Шевченко О.А., Гетманов Я.В. Опубл. 08.04.2010.
6. Гетманов Я.В. и др. Исследование устойчивости пучка для проекта литографического лазера на свободных электронах на базе ускорителя-рекуператора. // Письма в ЭЧАЯ – Статья принята к публикации.
7. Kulipanov G.N., ... Getmanov Ya.V. et al. Multiturn ERL x-ray source (MARS) feasibility study. – ERL2011, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs, 16-21 October 2011, Tsukuba, Japan. – pp. 60-63.
8. Shevchenko O.A., ... Getmanov Ya.V. et al. First Lasing of the Third Stage of Novosibirsk FEL. – FEL2015, 37th International Free Electron Laser Conference, 23-28 August 2015, Daejeon, Korea. – pp. 1-4.
9. Getmanov Ya.V. et al. Longitudinal stability of multiturn ERL with split accelerating structure. – ERL2013, The 53th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs, 9 -13 September 2013, Novosibirsk, Russia. – pp. 44-49.
10. Shevchenko O.A., ... Getmanov Ya.V. et al. Commissioning Status and Further Development of the Novosibirsk Multiturn ERL. – ERL2013, The 53th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs, 9 -13 September 2013, Novosibirsk, Russia. – pp. 6-20.
11. Kulipanov G.N., ... Getmanov Ya.V. et al. MARS: Fourth Generation X-Ray Light Source based on Multiturn Energy-Recovery Linac. –RUPAC2012, Russian Particle Accelerator Conference, 24-28 September 2012, Saint-Petersburg, Russia. – pp. 123-125.
12. Volkov V.N., Getmanov Ya.V. et al. Energy Recovering for Linac RF Injectors. – IPAC2014, 5th International Particle Accelerator Conference, 15 – 20 June 2014, Dresden, Germany. – pp. 356-358.

ГЕТМАНОВ Ярослав Владимирович

**Физические процессы
в многопроходном ускорителе-рекуператоре
для сверхъяркого источника СИ четвёртого поколения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 10.10.2016 г.

Подписано в печать 12.10.2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 усл. печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 19

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринте ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11