XXVIII Международная конференция

Российская конференция по ускорителям заряженных частиц (RuPAC'23)

11-15 сентября 2023 г.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Новосибирск 2023

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель – Логачев П.В. (ИЯФ СО РАН)
Зам. Председателя – Мешков И. Н. (ОИЯИ)
Зам. Председателя – Левичев Е.Б. (ИЯФ СО РАН)
Винокуров Н.А. (ИЯФ СО РАН)
Гавриш Ю. Н. (АО НИИЭФА)
Завьялов Н. В. (РФЯЦ ВНИИЭФ)
Иванов Е.М. (ПИЯФ)
Иванов С. В. (ИФВЭ, НИЦ КИ)
Корчуганов В. Н. (НИЦ КИ)
Кравчук Л. В. (ИЯИ РАН)
Кулевой Т. В. (ККТЭФ, НИЦ КИ)
Лебедев О. П. (ИФВЭ, НИЦ КИ)
Овсянников Д. А. (СПбГУ)
Пархомчук В. В. (ИЯФ СО РАН)
Полозов С. М. (НИЯУ МИФИ)
Ратахин Н.А. (ИСЭ)
Трубников Г. В. (ОИЯИ)
Фещенко А. В. (ИЯИ РАН)
Шарков Б. Ю. (ОИЯИ)
Шатунов Ю.М. (ИЯФ СО РАН)
Ширков Г. Д. (ОИЯИ)

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель – Левичев Е.Б. (ИЯФ СО РАН)
Секретарь – Кузин М.В. (ИЯФ СО РАН)
Беркаев Д.Е. (ИЯФ СО РАН)
Винокуров Н.А. (ИЯФ СО РАН)
Куксанов Н.К. (ИЯФ СО РАН)
Никифоров Д.А. (ИЯФ СО РАН)
Пархомчук В.В. (ИЯФ СО РАН)
Рева В.Б. (ИЯФ СО РАН)
Роговский Ю.А. (ИЯФ СО РАН)
Черепанова О.С. (РАН)
Шатунов Ю.М. (ИЯФ СО РАН)

BUDKER INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE

300 лет Российская Академия Наук

ЦЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

Обмен информацией и обсуждение вопросов ускорительной науки и техники, физики пучков заряженных частиц, разработки новых проектов лептонных и адронных коллайдеров, усовершенствования действующих установок, использования ускорителей для научных и прикладных целей, привлечение молодых учёных к решению проблем ускорительной техники.

ТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Современные тенденции в ускорительной технике • Коллайдеры • Динамика частиц в ускорителях и накопителях, методы охлаждения, новые методы ускорения • Циклические и линейные ускорители большой интенсивности • Ускорители тяжёлых ионов • Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах • Ускорительные технологии (магнитные и вакуумные системы, системы электропитания, управления и диагностики) • Сверхпроводящие технологии в ускорителях • Ускоряющие структуры и мощная радиотехника • Ионные источники и электронные пушки • Ускорители для медицины и прикладных целей.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Настоящий сборник включает в себя статьи участников конференции, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции или на стендовых сессиях, но не попали в труды конференции в один из Российских журналов. Материалы в данном сборнике публикуются без каких-либо правок и изменений, с сохранением авторского стиля и правописания.

ОГЛАВЛЕНИЕ

СТАТУС КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Корчуганов, А.Бельков, Е.Фомин, Е.Капорцев, Ю.Крылов, И.Кузьмин, Н.Мосейко, С.Пестерев, В.Попов, А.Смыгачева, А.Стирин, В.Ушаков, А.Валентинов
НИЦ «Курчатовский Институт», пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 РФ

Абстракт

Курчатовский источник синхротронного излучения продолжает работать в диапазоне энергий от вакуумного ультрафиолета до жесткого рентгеновского излучения. Максимальный ток электронов на энергии 2.5 ГэВ достигает 150 мА, количество одновременно работающих экспериментальных станций доходит до 12. Продолжается модернизация КИСИ в рамках Федеральной Целевой Программы. В 2021 году было закончено изготовление третьего ВЧ-генератора для большого накопителя, новых предварительных каскадов для двух имеющихся ВЧ-генераторов, новых волноводов. В текущем году завершается модернизация системы управления комплекса. Проведена реконструкция систем вентиляции здания, в котором расположен ускорительный комплекс, в том числе залов с ускорителями. Идёт подготовка к глубокой модернизации всего комплекса с заменой всех ускорительных установок в соответствии с Федеральной Научно-Технической Программой по развитию научной инфраструктуры.

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником синхротронного излучения на ускорительном-накопительном комплексе КИСИ (УНК) является большой накопитель (БН) на энергию 2.5 ГэВ. Магнитная структура БН обеспечивает эмиттанс 98 нм·рад на 2.5 ГэВ, ток электронов достигает 140 мА. В настоящее время осуществляется федеральная целевая программа по строительству национальной нанолаборатории (далее – ФЦП), которая должна закончиться в 2023 году. В рамках этой программы изготовлено в ИЯФ СО РАН и поставлено в НИЦ «Курчатовский институт» оборудование для модернизации ВЧ-системы, проведена модернизация инженерного оборудования здания, в котором размещается ускорительный комплекс, заканчивается модернизация системы управления. В 2021 году начались работы по подготовке к глубокой модернизации КИСИ в рамках федеральной программы по развитию научной инфраструктуры (далее – ФНТП). В результате выполнения этой программы все ускорительные установки КИСИ должны быть заменены на новые с целью уменьшить эмиттанс БН до 2.8 нм·рад и перейти к инжекции в БН на полной энергии 2.5 ГэВ.

СТАТИСТИКА РАБОТЫ УНК

Ускорительный комплекс работает на пользователей синхротронного излучения (СИ) круглосуточно (с понедельника по субботу) сеансами по 3-4 недели 9 месяцев в году. Около 10% запланированного времени тратится на инжекцию электронов в БН на энергии 450 МэВ и подъём энергии. После сеанса работы на пользователей следует одна неделя на профилактику систем, настройку машины и работы по ускорительной физике.

До 2020 года время работы на пользователей СИ составляло 2700 – 3000 часов в год. В 2020 году произошёл спад этого показателя из-за эпидемии коронавируса и масштабных работ по модернизации вакуумной системы (см. Таблицу 1).

Таблица 1: Статистика работы БН за последние 4 года.

Parameter	2020	2021	2022	2023
Время работы на пользователей, час	1202	1706	2182	1119
Интеграл тока, А·час	88.8	105.0	165.1	91.2
Среднее количество работающих станций	5.6	10.6	10.4	12.1
Average current, mA	74.8	73.4	73.9	61.5

В 2021 году начались работы по модернизации инженерных систем здания ускорительно-накопительного комплекса. Часть этих работ была несовместима с работой КИСИ, поэтому запланированное время работы в 2021 – 2023 годах оказалось существенно ниже возможного уровня. Общие потери времени оцениваются примерно в 4 месяца за последние два года, при этом в 2023 году недельные сеансы работы останавливались не в субботу, а в пятницу. Средний ток вырос за счёт увеличения времени жизни пучка. Стоит отметить, что со времени последних вакуумных работ на БН в 2020 году набран рекордный интеграл тока – 430 А·часов.

ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА В БОЛЬШОМ НАКОПИТЕЛЕ

На Рис. 1 показан поперечный профиль электронного пучка на энергии 2.5 ГэВ, полученный с помощью станции оптического наблюдения. Исходя из величин оптических функций для данного азимута, можно оценить горизонтальный эмиттанс пучка – он равен 90 нм. Вертикальный эмиттанс равен примерно 3% от горизонтального. При этом измеренный коэффициент связи поперечных бетатронных колебаний не превышает 0.1%. Вертикальный эмиттанс определяется наличием ненулевой вертикальной дисперсионной функции, максимум которой составляет около 3 см. Время жизни пучка на 2.5 ГэВ определяется уровнем вакуума. Для улучшения откачки используются блоки титановых испарителей в магниторазрядных насосах БН. Активация испарителей происходит дважды в неделю. Обнаружено, что сильнее всего на время жизни влияют испарители в начале 6-го суперпериода БН (структура БН состоит из 6 зеркально-симметричных суперпериодов). Время жизни увеличивается на 3-4 часа сразу после их активации. Время жизни на токе 100 мА достигает 28-30 часов, при токе, стремящемся к нулю, оно составляет 45-50 часов.

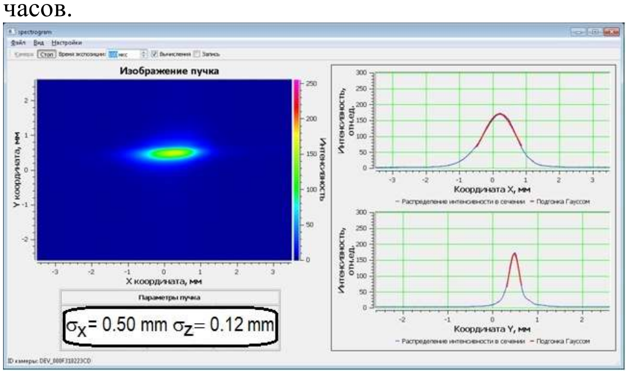


Рисунок 1: Профиль электронного пучка на энергии 2.5 ГэВ.

На рис.2 показан поперечный профиль пучка на энергии инжекции 450 МэВ и токе около 120 мА. Инжекция в БН осуществляется 1 раз в 40 секунд, при этом каждый раз заполняется одна сепаратриса из 75. В начале инжекции (до 4-5 сепаратрис) горизонтальный размер пучка составляет $\sigma_x = 0.38$ мм, далее он постепенно увеличивается, при этом наблюдаются и колебания размера. На энергии инжекции эмиттанс и энергетический разброс определяются многократным эффектом Тушека и, по-видимому, взаимодействием пучка со стенками вакуумной камеры и резонаторами. Время жизни пучка также определяется эффектом Тушека. Положительным следствием увеличения горизонтального размера является увеличение времени жизни с 40 минут в начале инжекции до примерно 100-120 минут в конце (150 мА и 60-70 сепаратрис). На азимуте впускного септум-магнита, где имеется самое сильное ограничение горизонтальной апертуры ±20 мм, горизонтальный размер пучка примерно втрое больше, чем на азимуте наблюдения. Из-за роста размера приходится снижать предудар при накоплении, что уменьшает коэффициент перепуска электронов с 50-55% до 35-40%. Стабильность перепуска удалось повысить после уменьшения длительности импульса инфлектора и прединфлектора с 800 нсек до 400 нсек. Теперь эти полусинусоидальные импульсы короче времени оборота пучка в БН (414 нсек). Ограничивают накопленный ток возникающие коллективные синхронные колебания всех сгустков. Продолжение инжекции в этом случае приводит к гибели части пучка.

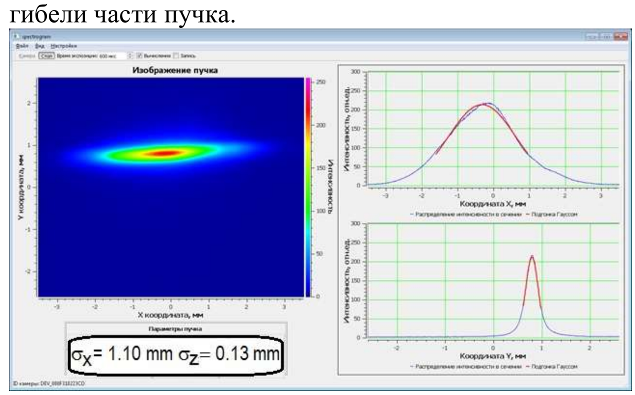


Рисунок 2: Профиль электронного пучка на энергии 0.45 ГэВ. Ток пучка 120 мА, 50 сгустков.

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА (ФЦП)

В рамках ФЦП проводится модернизация систем КИСИ без изменения общей схемы работы ускорительных установок (большой и малый накопители, линейный ускоритель, каналы перепуска электронов) и их основных элементов. Выполнение программы продлено до конца 2023 года. В связи с появлением ФНТП часть работ перенесена на более поздний период. Далее перечислены основные работы по отдельным пунктам ФЦП1, выполняемые за последние два года.

ВЧ-система

Изготовление 3-го ВЧ-генератора БН и модернизация предварительных каскадов усиления двух старых ВЧ-генераторов. Изготовление шкафов питания и управления ВЧ-системы, новых волноводов. Монтаж новой ВЧ-системы перенесён в программу 2, как и монтаж новых питающих и охлаждающих коммуникаций, модернизация системы электроснабжения. Оборудование изготовлено в ИЯФ (г. Новосибирск) и поставлено в НИЦ «Курчатовский институт» в конце 2021 года.

Инженерные системы здания

В 2021-2023 годах проводились масштабные работы по модернизации здания, в котором расположен ускорительно-накопительный комплекс и экспериментальные станции пользователей СИ. Затронуты помещения в старой части здания (до реконструкции и расширения в 2012 году). Все работы можно разделить на три части.

Во-первых, проведена замена ламп освещения с люминисцентных на светодиодные во всех помещениях, включая ускорительные и экспериментальные залы. Во-вторых, проведена модернизация электрощитовой здания, заменены все кабели от электрощитовой до щитов электроснабжения в помещениях. В-третьих, проведена замена вентиляционных установок, обеспечивающих микроклимат в помещениях здания и венткоробов для связи их с помещениями. В настоящий момент ведутся работы по монтажу и пусконаладке систем, обеспечивающих круглогодичную стабилизацию температуры охлаждающего воздуха в заданных пределах. Это должно создать более комфортные условия для работы оборудования УНК в жаркое время года.

Все работы на инженерных системах должны быть закончены в октябре 2023 года.

Новые клистроны

В рамках ФЦП с НПП «Торий» заключён контракт на изготовление поставку двух клистронов типа КИУ-53А с фокусирующими катушками. Клистроны должны быть поставлены в сентябре 2023 года и испытаны на действующей клистронной станции «Оливин», питающей линейный ускоритель КИСИ. Клистроны предназначены для замены работающего сейчас клистрона, эмиссионные характеристики которого постепенно ухудшаются.

Система автоматизированного управления (САУ)

САУ УНК контролирует около 2000 управляющих и более 5000 измерительных каналов различного вида (цифровых, аналоговых, дискретных, импульсных и др.) и природы (токи, напряжения, температуры, временные интервалы, логические сигналы).

В настоящее время управление УНК состоит из двух частей: одна под управлением сервера CitectSCADA, другая под управлением ЭВМ CANServer (управление устройствами по CAN-шине). В результате модернизации должна быть реализована единая структура управления УНК от новых серверов CitectSCADA с передачей данных по Ethernet. Планируется перевод САУ на единый цикл управления отдельными подсистемами 100 мсек (сейчас для БН это 160 мсек).

Модернизированная САУ УНК «Сибирь» на базе современной техники, в соответствии с работами по системной интеграции закупленных компонентов, разработкой прикладного программного обеспечения должна обеспечить бесперебойную работу и улучшить основные параметры ускорителей КИСИ.

Специализированное программное обеспечение САУ должно обеспечивать надёжное и безопасное управление всеми системами УНК, выполнение необходимых алгоритмов управления, сбор, передачу, визуализацию, хранение полученных данных, предупреждение о сработавших блокировках и возможных аварийных ситуациях.

Количество нового оборудования и объём работ достаточно подробно изложены в докладе [1] на RUPAC-21. В настоящее время заканчивается монтаж оборудования новой САУ, запуск УНК после пусконаладочных работ намечен на конец октября 2023 года.

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ПРОГРАММА ПО РАЗВИТИЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (ФНТП)

В соответствии с ФНТП все ускорительные установки КИСИ должны быть демонтированы и заменены на новые. Вместо БН с эмиттансом 98 нм должен появиться новый источник синхротронного излучения с эмиттансом 2.8 нм с инжекцией на полной энергии 2.5 ГэВ. В качестве инжектора будет использоваться бустерный синхротрон, работающий с циклом 1 секунда и энергией инжекции 200 МэВ из нового линейного ускорителя. Из оборудования КИСИ без изменения останется ВЧ-система БН (модернизированная в рамках ФЦП), часть оборудования САУ и сверхпроводящие вигглеры. Должны также сохраниться каналы вывода СИ из поворотных магнитов. Более подробное описание нового ускорительного комплекса приведено в [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускорительный комплекс КИСИ продолжает эффективно работать на пользователей СИ. Окончание текущей модернизации должно привести к дальнейшему росту его характеристик. В результате глобальной модернизации по программе развития научной инфраструктуры будет создан современный источник яркого синхротронного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] V.Korchuganov *et al.*, “Status of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source”, in *Proc. RUPAC’21*, Alushta, Russia, Sep.2021, pp.55-57. doi:10.18429/JACoW-RUPAC2021-TUC01

[2] V.Korchuganov *et al.*, “New Lattice Design for Kurchatov Synchrotron Radiation Source”, in *Proc. RUPAC’21*, Alushta, Russia, Sep.2021, pp.297-299. doi:10.18429/JACoW-RUPAC2021-TUPSB34

МЕДИЦИНСКИЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЦИКЛОТРОН МСЦ-230. СТАТУС ПРОЕКТА

С. Л. Яковенко[#], А. В. Агапов, Р. Г. Айданов, В. В. Борисов, В. А. Весенков, В. А. Герасимов, О. М. Голубицкий, С. В. Гурский, О. В. Карамышев, Г. А. Карамышева, Н. В. Киричков, И. Н. Киян, А. А. Котова, О. Е. Лепкина, И. Д. Ляпин, В. А. Малинин, Г. В. Мицын, Д. Н. Никифоров, А. А. Павлова, М. В. Петров. Р. В. Пивин, Д. В. Попов, Н. С. Потапова, В. М. Романов, Н. А. Рыбаков, А. А. Синица, Г. В. Трубников, Г. Д. Ширков, С. Г. Ширков, С. Б. Федоренко, Г. Г. Ходжибагиян, ОИЯИ, Дубна, Россия

Ю. Н. Гавриш*,* В. Г. Мудролюбов*,* Ю. К. Осина*,* К. Е. Смирнов*,* НИИЭФА, Санкт-Петербург, Россия

Абстракт

В Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) совместно с Научно-исследовательским институтом электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова (НИИЭФА) ведется разработка медицинского сверхпроводящего циклотрона МСЦ-230. Сверхпроводящий изохронный циклотрон МСЦ-230 предназначен для проведения протонной лучевой терапии и медико-биологических исследований. Ускоритель рассчитан на работу в непрерывном и импульсном режимах с максимальной энергией протонного пучка 230 МэВ и максимальным током до 10 микроампер. Характеристики циклотрона позволят проводить различные эксперименты в области протонной терапии, в том числе по изучению флэш-эффекта. Приведены основные технические характеристики МСЦ-230, описание его систем и компоновка циклотрона. Представлен статус работ по реализации проекта.

ЦИКЛОТРОН МСЦ-230

Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230 (рис.1) - изохронный компактный циклотрон весом 130 тон, высотой 1,7 метра и диаметром 4 метра [1]. Сверхпроводящие катушки размещаются криостате. В качестве ускорительной вакуумной камеры в МСЦ-230 используется область внутри ярма магнита и стенки криостата. Основные параметры циклотрона приведены в Таблице 1.

Электромагнит циклотрона

Электромагнит циклотрона состоит из сверхпроводящих катушек и «теплого» ярма, обеспечивающего магнитное поле в центре 1.7 Тл. Ярмо состоит из четырех пар секторов и ярма броневого типа. Размеры ярма рассчитаны таким образом, чтобы ограничить рассеянное магнитное поле в диапазоне 200 Гс вблизи ускорителя, избегая наличия областей ненасыщенного железа. В качестве основы для изготовления сверхпроводящих катушек выбрана технология с использованием трубчатого композитного сверхпроводящего кабеля, предложенная в Лаборатории физики высоких энергий имени Векслера и Балдина (ЛФВЭ) и хорошо зарекомендовавшая себя в магнитах синхротрона Нуклотрон [2].

Рисунок 1: Общий вид циклотрона (модель).
1 - ярмо, система подъема ярма, 3 – вакуумные насосы, 4 - пробник, 5- гелиевый рефрижератор, 5- резонаторы, 6 – полюса магнита, 7- криостат.

Таблица 1. Параметры МСЦ-230

Энергия протонов, МэВ	230
Ток пучка (непрерывный режим), мкА	1
Ток пучка(импульсный режим), мкА	10
Длительность импульса, мс	10-100
Длительность фронта импульса, мс	≤ 1
Нестабильность тока	±5%
Среднее магнитное поле (R_0/R_{extr}), Тл	1.7 /2.15
Габариты (высота × диаметр), мм	1700×3960
Масса ярма, т	130
Ток в обмотке возбуждения (на одну катушку), Ампер-витки	265 000
Частота ускорения, МГц	106,5
Число гармоник	4
Потребляемая мощность резонансной системы, кВт	60

Криостат (Рис. 2) состоит из вакуумного кожуха и теплового экрана. Сверхпроводящие катушки, размещенные в криостате, охлаждаются потоком гелия сверхкритического давления, который прокачивается внутри охлаждающего канала кабеля (Рис. 3). Усилия, действующие на сверхпроводящие катушки, воспринимаются тремя подвесами и тремя радиальными опорами. Тепловой экран соленоида охлаждается четырьмя криокулерами, а также, потоком кипящего азота, пары которого реконденсируются в гелиевом рефрижераторе. Жидкий азот стекает из рефрижератора к тепловому экрану по сифону для подачи и возврата в рефрижератор жидких гелия и азота. Сифон имеет изоляционный вакуумный объем, тепловой экран, охлаждаемый парами азота, и многослойную экранно-вакуумную изоляцию.

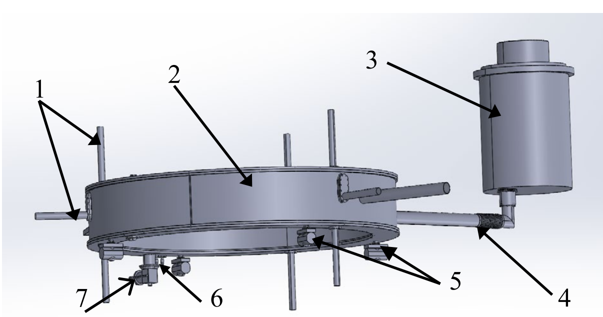


Рисунок 2: Модель криогенной системы.
1 – элементы системы поддержки и юстировки сверхпроводящих катушек, 2 – вакуумный кожух криостата, 3 – гелиевый рефрижератор, 4 – сифон, 5 – криокулеры для охлаждения теплового экрана, 6 – токовводы, 7 – криокулер для охлаждения токовводов.

Для электрического питания магнита МСЦ- 230 будет использован прецизионный источник постоянного тока на 600 А с напряжением до 10 В. Ввод тока в криостат осуществляется с помощью одной пары ВТСП токовводов, охлаждаемых криокулером. Источник питания снабжен системой индикации нормальной зоны по методу контроля баланса напряжения в плечах мостиковой схемы и системой эвакуации запасенной в магните энергии на гасящее сопротивление. Защита магнита от перегрева при его переходе из сверхпроводящего состояния в нормальное состояние решается с помощью секционирования соленоида и равномерного выделения энергии во всей обмотке. Для этого обмотка электрически разделена на участки. Запасенная в магните энергия диссипируется как на внешнем сопротивлении, так и на шунтах – нагревателях, расположенных между слоями обмотки верхней и нижней катушек (Рис. 3).

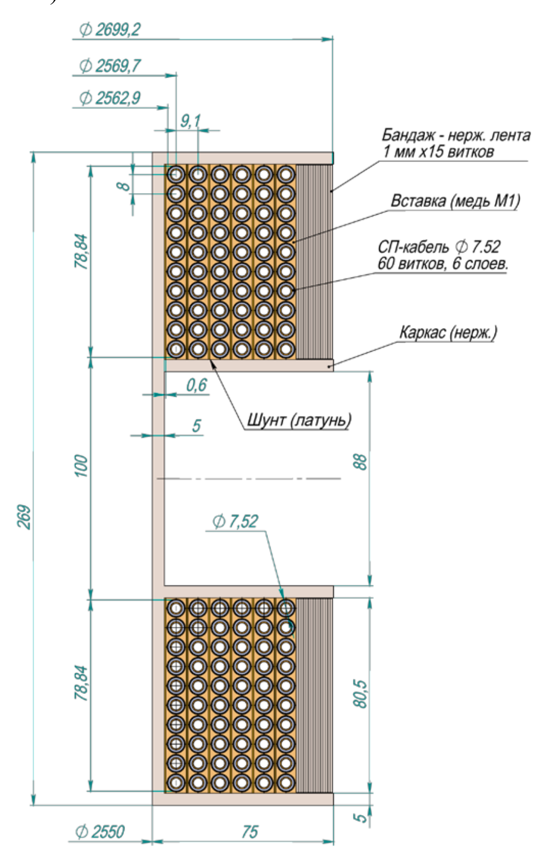


Рисунок 3: Сечение обмотки соленоида МСЦ-230.

Центральная область

В циклотроне МСЦ-230 будет использоваться внутренний источник типа Пеннинга с катодом прямого накала. Источник вводится в циклотрон вертикально снизу, щель источника находится на радиусе ~18 мм. Зазор между пулером и щелью источника ≤ 2мм. Соединение верхних и нижних половин дуантов всех четырех резонаторов осуществляется посредством крестообразной центральной области (Рис.4). Центральная область будет установлена на нижнюю часть резонансной системы (верхний крест, пулер, нижний крест соединяются с нижними половинами дуантов винтами). Дуанты верхней части резонансной системы при опускании в рабочее положение будут соединяться с центральной областью посредством контактов.

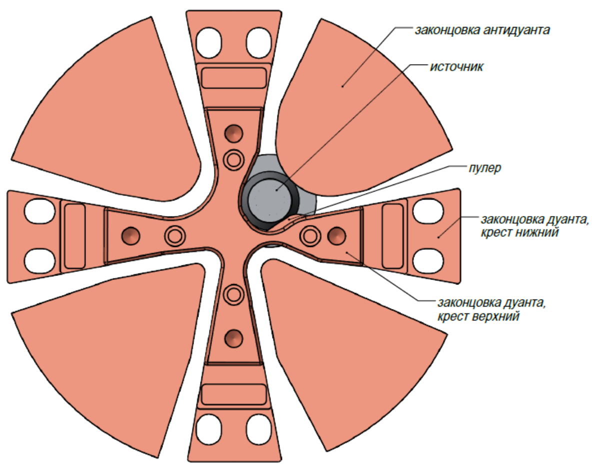


Рисунок 4: Центральная область МСЦ-230.

Резонансная система

Резонансная ускоряющая система, состоит из восьми контуров с распределёнными параметрами, полностью размещённых в долинах электромагнита (Рис.5). Каждый контур является полуволновым резонатором, состоящим из дельта-электрода, двух штоков и плакировки долины, которая является внешним проводником соответствующей пары контуров. Верхняя и нижняя плоские части плакировки исполняют функцию закорачивающих фланцев. Для обеспечения работы всех контуров в синфазном режиме предусмотрено их гальваническое соединение в центральной области циклотрона. Такое техническое решение позволяет за счёт выбора диаметров штоков и мест их соединения с дельта-электродами влиять на закон изменения амплитуды высокочастотного напряжения по радиусу, в том числе со значительным ростом от центра к конечному радиусу ускорения (от 30 до 80 кВ). Наличие восьми ускоряющих промежутков и работа высокочастотной системы на четвёртой гармонике частоты обращения протонов обеспечивают высокий темп ускорения.

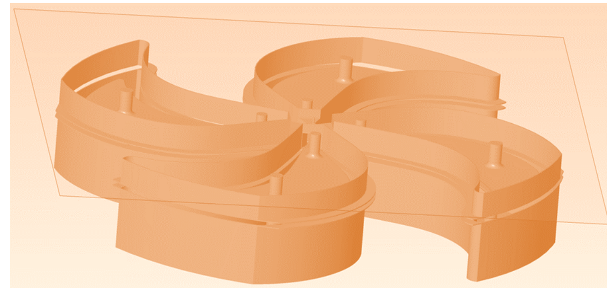


Рисунок 5: Размещение резонансной системы в долинах электромагнита (сечение выше медианной плоскости).

Система вывода

Вывод пучка из данного циклотрона будет осуществляться с помощью электростатического дефлектора (ЭСД), расположенного между секторами циклотрона, и двух пассивных фокусирующих магнитных каналов 1 и 2 (Рис.6). Электростатический дефлектор позволяет отклонить пучок из зоны ускорения с помощью электрического поля, перпендикулярного траектории пучка. Магнитные каналы применяют для компенсации горизонтальной дефокусировки, которую испытывает пучок после отклонения дефлектором, попадая в область спадающего с радиусом магнитного поля. Пучок после прохождения через дефлектор проходит через ускоряющий резонатор и затем выходит из циклотрона. Пассивные магнитные каналы расположены вдоль секторов, первый магнитный канал вносит изменение магнитного поля 600 Гаусс и градиент 1000 Гс/см, второй магнитный канал вносит градиент 1700 Гс/см. Основные потери пучка происходят в основном на начальной части септума дефлектора и существенно зависят от его толщины, поэтому толщина септума выбрана 0.1 мм.

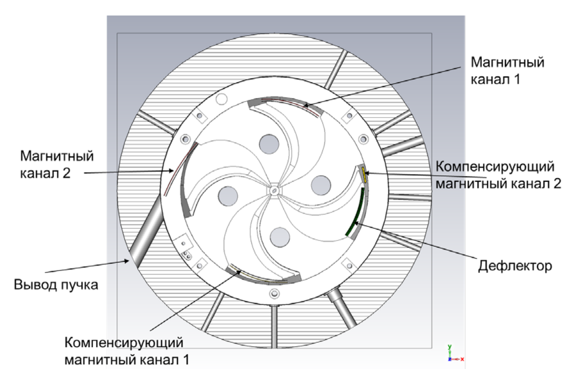


Рисунок 6: Схема вывода пучка из МСЦ-230.

Вакуумная система

Вакуумная камера в циклотроне МСЦ 230 - область внутри ярма магнита и стенки криостата. В циклотроне между верхним ярмом, и криостатом, и нижним ярмом располагаются уплотнительные кольца. Для получения протонного пучка высокой интенсивности предполагается интенсивное натекание водорода в вакуумную камеру. Максимальный расход водорода 4 см^3/мин. Вакуумная система должна обеспечить и поддерживать давление остаточного газа в циклотроне при неработающем источнике $2*10^{-7}$ Торр, рабочий вакуум $1,8*10^{-5}$ Торр. Для обеспечения вакуумных условий в циклотроне будут использованы четыре турбомолекулярных насоса с производительностью 2300-2800 л/с (производительность по водороду 1700-2000 л/с) расположенными по два сверху и снизу циклотрона.

Диагностика пучка в циклотроне

Для эффективной настройки ускорения и вывода пучка МСЦ-230 будет оснащен необходимы двумя радиальными, дифференциальных пробниками и цилиндром Фарадея на выходе их циклотрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время разработан эскизный проект циклотрона МСЦ-230. Ведется техническое проектирование его систем. Начато производство отдельных элементов циклотрона. Параллельно ведется подготовка площадки для размещения МСЦ-230 на площадке ОИЯИ. Финальная сборка циклотрона и его запуск запланированы на конец 2024 года.

ССЫЛКИ

[1] О. В Карамышев, и др., Исследования и разработка сверхпроводящего циклотрона SC230 для протонной терапии, Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 1(233). С. 73–85

[2] H. G. Khodzhibagiyan, et. al., Solenoid for Spin Physics Detector at NICA from the Nuclotron-Type Superconductor Cable, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, Vol. 19, № 4, pp. 397-401

СТАТУС У-70

В.А. Калинин, Ю.М. Антипов, А.Г. Афонин, Д.А. Васильев, А.М. Зайцев, Н.И. Игнашин, С.В. Иванов, В.Г. Лапыгин, О.П. Лебедев, А.В. Максимов, Ан.М. Маркин, Ю.В. Миличенко, А.П. Солдатов, С.А. Стрекаловских, С.Э. Сытов, Н.Е. Тюрин
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Протвино, Россия

Аннотация

Обзорный доклад - представляет текущее состояние Ускорительного комплекса У-70 НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ. Акцент сделан на недавние работы и усовершенствования, осуществлённые со времени предыдущей конференции RUPAC-2021 в хронологическом порядке сеансов.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс У-70 представленный на рисунке 1 состоит из четырех ускорителей – двух линейных (И-100, УРАЛ-30) и двух кольцевых (У-1.5, У-70). Со времени предыдущей конференции RuPAC-2021 на ускорительном комплексе У-70 проведено четыре сеанса работы. В каждом сеансе Ускорительный комплекс вначале работал в протонной моде – в этой моде задействуется каскад ускорителей УРАЛ-30 – У-1.5 – У-70, а завершался сеанс в ионной (углеродной) моде в которой задействовались ускорители И-100 - У-1.5 – У-70.

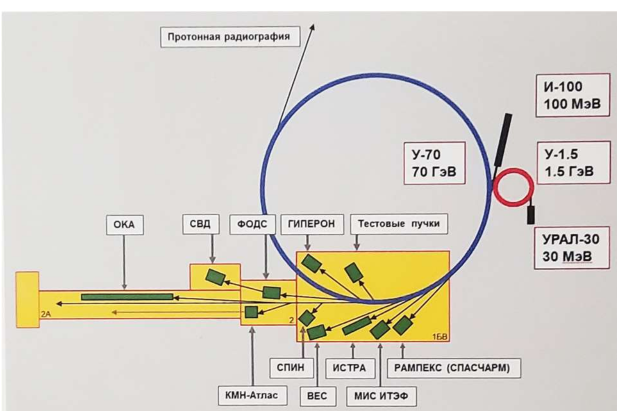


Рисунок 1: Ускорительный комплекс У-70 с каналами перевода и экспериментальными установками.

ВТОРОЙ СЕАНС 2021

В начале сеанса были запущены и настроены технологические системы ускорителей. Проведены исследования режимов ускорителей с протонным пучком в следующей последовательности: УРАЛ-30 с энергией на выходе 30 МэВ, У-1.5 с энергией на выходе 1.32 ГэВ.

В протонной моде Ускорительный комплекс У-70 работал с пучком протонов попеременно в нескольких режимах:

- в период с 25.10.21 по 01.11.21 – (полная энергия на выходе W_{OUT} = 50 ГэВ, длительность основного плато T_{MAIN} = 0.4 с). В ходе проведения работ была осуществлена настройка ускорителя и выполнены исследования по программе У-70: получена циркуляция и ускорение пучка в У-70, настроен быстрый вывод в 22 канал, настроен параллельный вывод пучка в 8 (21) канал (стохастический медленный вывод (СМВ)[1]) и 22 канал (вывод с использованием станции кристаллических дефлекторов (СКД-30)), настроено параллельное наведение на внутренние мишени (ВМ) и кристалл, проведены исследования станций кристаллических дефлекторов (СКД-18, СКД-19);
- в период с 01.11.21 по 15.11.20 – (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 2.45 с) На первой половине основного плато пучок параллельно выводился на установки СПИН (8 к, СМВ), ОКА (с 03.11.21) (8(21) к, СМВ) и ФОДС (22 к, СКД-30) (рисунок 2, рисунок 3). Суммарная интенсивность выведенного пучка на три канала составляла $(1.0 \div 3.3)\cdot 10^{12}$ протонов за цикл. На второй половине основного плато – работала установка СПАСЧАРМ (14к, 24ВМ). Интенсивность, выводимая на мишень, составляла $(0.3 \div 0.7)\cdot 10^{12}$ протонов за цикл;
- в период с 15.11.21 по 03.12.21 – (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 2.45 с). Длительность основного плато в этот период была разбита на три сегмента. На первом сегменте длительностью 0.3 с работал протонный радиографический комплекс ПРГК-100 (первый приоритет) (быстрый (БВ) в канал инжекции (КИ)). Средняя интенсивность в сгустке – $3.0\cdot 10^{11}$ протонов, а максимальная – $3.6\cdot 10^{11}$ протонов. На втором сегменте длительностью 1 с пучок выводился на установки СПИН (8 к, СМВ), ОКА (8(21) к, СМВ) и ФОДС (22 к, СКД-30). На третьем сегменте длительностью 0.9 с параллельно работали установки СПАСЧАРМ (14 к, 24ВМ), ГИПЕРОН-М (18 к, 35ВМ) и ИСТРА-КРИСТАЛЛ (4А к, СКД27);

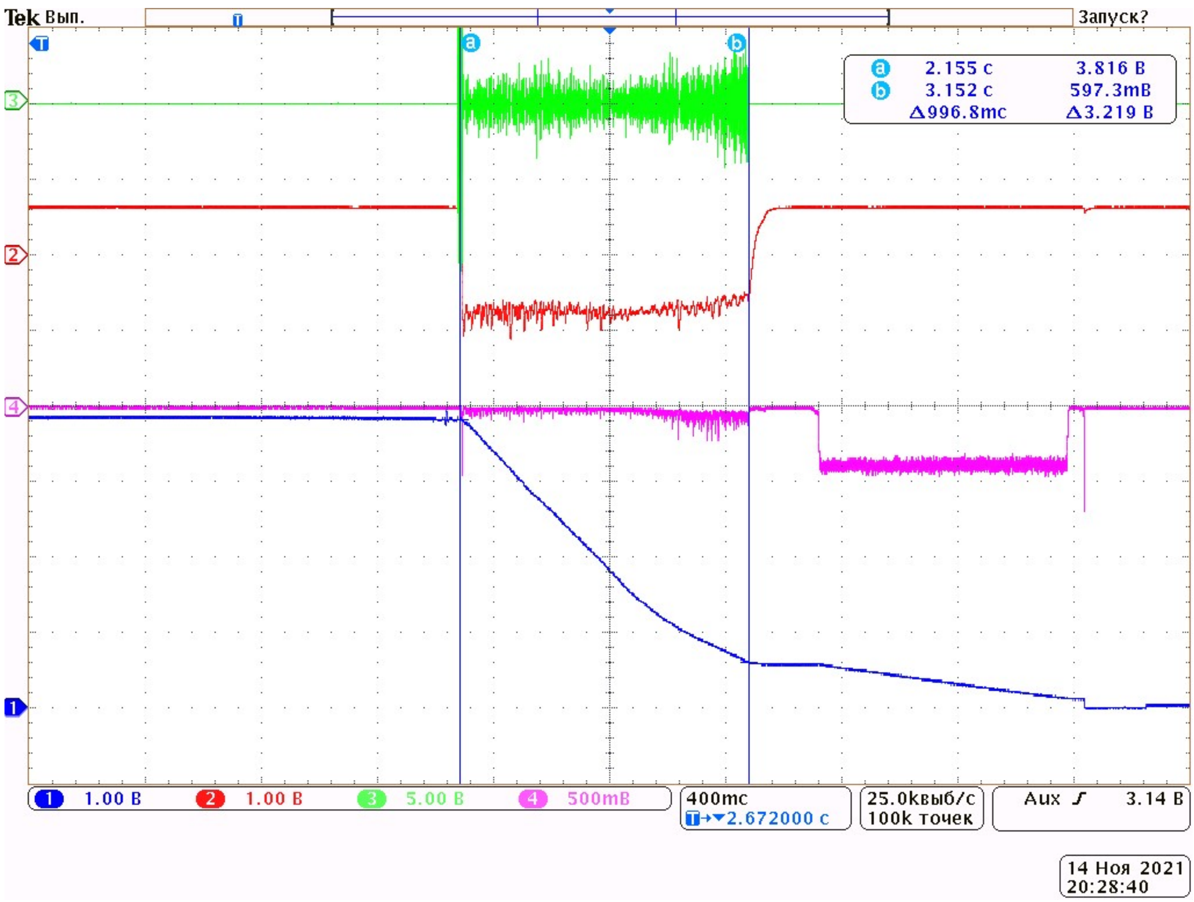


Рисунок 2: Параллельный вывод на физические установки (лучи сверху вниз: сигнал шума наведения, сигнал обратной связи со 106-го монитора, сигнал вторичных частиц с 24-го монитора сигнал индукционного датчика тока пучка).

Рисунок 3: Копия экрана online монитора системы медленного вывода пучка из У-70 (лучи сверху вниз: коэффициент прохождения тока выводимой фракции пучка по трассе вывода (эффективность) – 92-93 %, интенсивность вывода (на уровне $1 \cdot 10^{12}$ протонов в импульсе)).

- в период с 03.12.21 по 15.12.21 – (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 2.45 с). Длительность основного плато была поделена на две неравные части. На первой части основного плато длительностью 0.4 с пучок выводился двумя последовательными быстрыми выводами на установки ПРГК-100 и НЕЙТРОН. На установку НЕЙТРОН (8(23) к, БВ) выводились 1÷2 сгустка. На второй части основного плато длительностью 2.2 с работали установки СПАСЧАРМ (14 к, 24ВМ), ВЕС (4Д к, 27ВМ) и ГИПЕРОН-М (18 к, 35ВМ). Суммарная интенсивность на три мишени составляла $(2.0 \div 2.4)\cdot 10^{12}$ протонов за цикл.

Переход на ионную моду работы комплекса У-70 для исследований по прикладной радиобиологии, проводимых на ЦКП РБС У-70 в экспериментальном зале 1БВ, был осуществлен 16 декабря.

- в период с 16.12.21 по 21.12.21 – Запуск и исследования с пучком ядер углерода в ускорителях У-1.5 и У-70. Получена циркуляция пучка энергией 455 МэВ на нуклон в У-70 на принимающей площадке магнитного поля 353 Гс. Настроены режимы замедления пучка до энергии 455, 400, 350, 300, 250, и 200 МэВ на нуклон и равномерного вывода в зону ЦКП РБС У-70[2];
- в период с 21.12.2021 по 29.12.2021 работа на потребителей. Проводились облучения животных, флаконов и слайдов с клетками, дозами от 0.03 Гр до 20 Гр, до пика Брэгга, в пике Брэгга и за пиком. Исследования алмазных детекторов в смешанных полях излучения проводились при энергиях пучка 455, 400, 350, 300, 250, и 200 МэВ на нуклон. Проводилось освоение методик верификации планов облучения.

ПЕРВЫЙ СЕАНС 2022

После запуска, настройки и исследований на ускорителях УРАЛ-30 У-1.5 и У-70 на ускорительном комплексе У-70 началась программе физических исследований в протонной моде. Полная энергия протонов на всем времени физической программы составляла 50 ГэВ, длительность основного плато 0.9 с. Основным потребителем выступала установка ПРГК-100, попеременно проводились исследования на 8-ми экспериментальных физических установках: ОКА, СПИН, ФОДС, НЕЙТРОН, ВЕС, ИСТРА-КРИСТАЛЛ, СПАСЧАРМ, ГИПЕРОН. Установка ПРГК-100 работала последовательно с остальными физическими установками её работа осуществлялась с быстро выведенными сгруппированными сгустками, в количестве от 1-го до 7-ми, интенсивностью $2 \div 3.5\cdot 10^{11}$ протонов в сгустке. Далее последовательно с ПРГК-100, на первой половине основного плато параллельно работали установки ОКА (8к,21к; СМВ), СПИН (8к; СМВ) и ФОДС (22к; СКД-30) длительность вывода на три установки составляла 0.3 с интенсивность $1\cdot 10^{12}$ протонов за цикл. На второй половине стола параллельно работали установки ИСТРА-КРИСТАЛЛ (4а; СКД-27, 27 ВМ), СПАСЧАРМ (14к; 24ВМ) и ГИПЕРОН-М (18к; 35 ВМ). Суммарная интенсивность на три мишени составляла $(1.0 \div 1.3)\cdot 10^{12}$ протонов за цикл, длительность вывода 0.35 с. После окончания работы установки ИСТРА-КРИСТАЛЛ вступила в работу установка ВЕС (4Д;27 ВМ). После окончания работы установок ОКА, СПИН, ФОДС, вместо них на первой половине стола включилась установка НЕЙТРОН (быстрый вывод в 8,23к;).

Переход на ионную моду с медленным выводом пучка ядер углерода (удельная энергия от 200 до 455 МэВ/нуклон) для исследований по прикладной радиобиологии, проводимых на ЦКП РБС У-70 в экспериментальном зале 1БВ, был осуществлен 11.04.2022.

Запуск и исследования с пучком ядер углерода заняли трое суток. За этот период времени была получена циркуляция пучка энергией 455 МэВ/нуклон в У-70 на принимающей площадке магнитного поля 353 Гс. Настроены режимы замедления и равномерного вывода в зону ЦКП РБС У-70 пучков ядер углерода с удельными энергиями 200, 250, 300, 350, 400 и 455 МэВ/нуклон (рисунок 4). Для каждой энергии настроены режимы работы системы разравнивания пучка (вобблер-магниты). На потребителей ускорительный комплекс работал 11 суток. Потребителями были коллеги из МРНЦ имени А.Ф. Цыба, ИМБ РАН, ИТЭБ РАН, ИАТЭ НИЯУ МИФИ, НИ ТПУ.

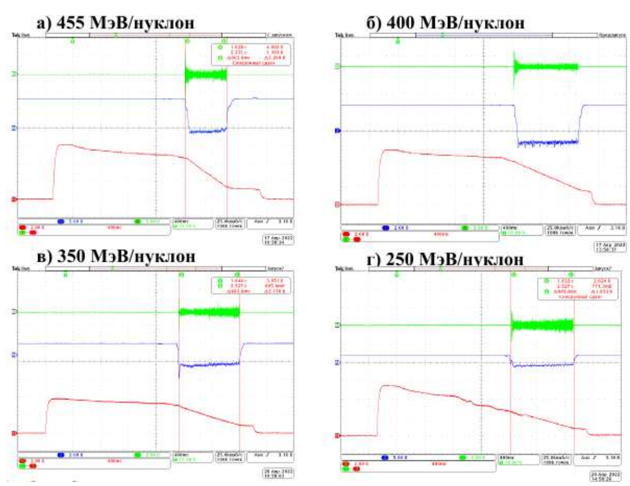


Рисунок 4: Режимы замедления и вывода пучков ядер углерода с удельными энергиями 455 МэВ/нуклон (а), 400 МэВ/нуклон (б), 350 МэВ/нуклон (в) и 250 МэВ/нуклон (г) (лучи сверху вниз: сигнал шума наведения, сигнал обратной связи, сигнал индукционного датчика тока пучка)

ВТОРОЙ СЕАНС 2022

Во втором сеансе 2022 года в протонной моде Ускорительный комплекс У-70 работал попеременно в нескольких режимах. Полная энергия протонов в этих режимах была или 50 или 60 ГэВ. Длительность основного стола менялась от 0.4 с до 2.0 с.

С 13.11.2022 по 16.11.2022 – (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 0.5 с) (W_{OUT} = 60 ГэВ, T_{MAIN} = 0.4 с) режим настройки и исследований в синхротроне У-70. В ходе проведения работ была осуществлена настройка ускорителя и выполнены исследования по программе У-70: получена циркуляция и ускорение пучка в У-70, настроен быстрый вывод в 22 канал при энергии протонов 50 ГэВ и 60 ГэВ. Проведены исследования вывода пучка с использованием станций кристаллических дефлекторов СКД 18 и СКД 19. Настроен параллельный вывод пучка на внутренние мишени;

С 17.11.2022 по 24.11.2022 - (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 1 с) Работал протонный радиографический комплекс ПРГК-100 (первый приоритет) и выполнялась физическая программа на установках ОКА, СПИН, ФОДС (8-21к, 8к, 8-22к соответственно, СМВ, СКД 30); ИСТРА-КРИСТАЛЛ, СПАСЧАРМ, ГИПЕРОН-М (4а, 14к, 18к соответственно, ВМ#27, ВМ#24, ВМ#35). Средняя интенсивность в сгустке $3.0 \cdot 10^{11}$ протонов, а максимальная $3.4 \cdot 10^{11}$ протонов.

С 24.11.2022 по 04.12.2022 - (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 1 с) (W_{OUT} = 60 ГэВ, T_{MAIN} = 0.46 с) Вместо установок ОКА, СПИН, ФОДС вступила в работу установка НЕЙТРОН (8-23к, БВ). Продолжили работу протонный радиографический комплекс ПРГК-100 и физические установки (СПАСЧАРМ, ВЕС, ГИПЕРОН-М). 26 ноября был произведен переход на энергию 60 ГэВ, в данном режиме работали только установки ПРГК-100 и НЕЙТРОН;

С 04.12.2022 по 16.12.2022 - (W_{OUT} = 50 ГэВ, T_{MAIN} = 2 с) Установки ПРГК 100 и НЕЙТРОН закончили работу. На первой половине основного плато пучок выводился на установки ОКА, СПИН, ФОДС (8-21к, 8к, 8-22к соответственно, СМВ, СКД-30); на второй половине стола пучок параллельно выводился на установки ВЕС, СПАСЧАРМ, ГИПЕРОН-М (4а, 14к, 18к соответственно, ВМ#27, ВМ#24, ВМ#35). Работа ускорительного комплекса показана на рисунке 5 и рисунке 6.

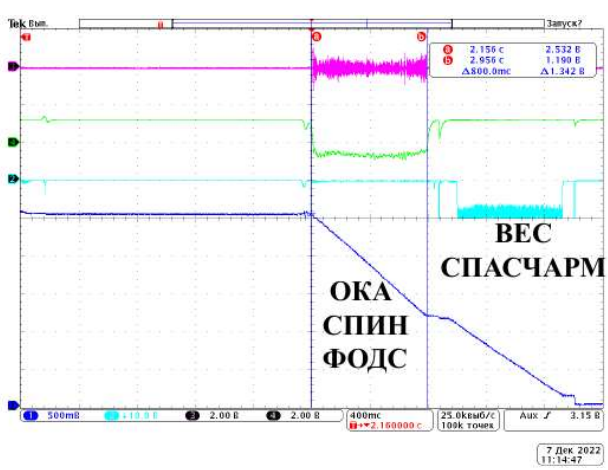


Рисунок 5: Параллельный вывод на физические установки (лучи сверху вниз: сигнал шума наведения, сигнал обратной связи со 106-го монитора, сигнал вторичных частиц с 24-го монитора сигнал индукционного датчика тока пучка).

Переход на ионную моду был осуществлен 16 декабря.

С 16.12.2022 по 21.12.2022 Запуск и исследования на ускорителях И-100, У-1.5, и У-70. За это время были настроены режимы замедления пучка до энергии 400 и 250 МэВ на нуклон и равномерного вывода в зону ЦКП РБС У-70. Для каждой энергии настроены режимы работы системы разравнивания пучка (вобблер-магниты).

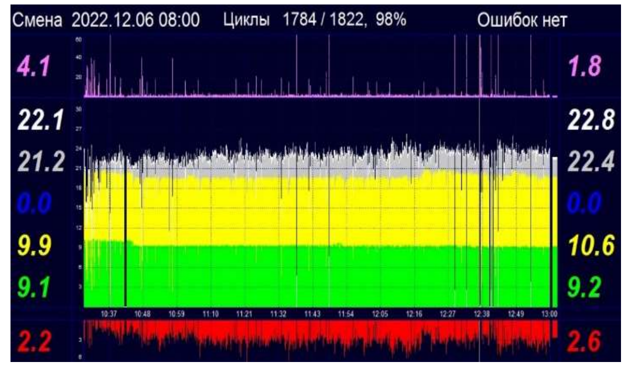


Рисунок 6. Статистика интенсивности У-70 (сверху вниз: потери при ускорении (в процентах), интенсивность накопленная ($\cdot 10^{11}$ протонов), интенсивность ускоренная, интенсивность быстрого вывода, интенсивность медленного вывода, интенсивность, выведенная на ВМ, интенсивность, выведенная на поглотитель).

С 19.12.2022 по 30.12.2022 Работа на потребителей. Потребителями выступали коллеги из ИАТЭ НИЯУ МИФИ (облучение клеток при энергии 400 МэВ/нуклон), МРНЦ имени А.Ф. Цыба (облучение клеток при энергии 400 МэВ/нуклон, дозы от 0.2 до 9 Гр), НМИЦПН (облучение мышей энергия 400 МэВ/нуклон, доза 0.18 Гр), НИ ТПУ (облучение материалов энергия 400 МэВ/нуклон), ИТЭБ РАН (облучение препаратов с клетками, облучение мышей, энергия 450 МэВ/нуклон, дозы от 2 до 30 Гр), ГНЦ РФ – ИМБП РАН (облучение крыс энергия 450 МэВ/нуклон, облучение макак энергия 450 МэВ/нуклон), и МГУ (облучение макаки резус, энергия 400 МэВ/нуклон, доза 0.7 Гр). Суммарно при работе на потребителей во втором сеансе 2022 года было проведено 154 облучения.

ПЕРВЫЙ СЕАНС 2023

Первый сеанс 2023 года начался традиционно в протонной моде с последовательного запуска ускорителей УРАЛ-30, У-1.5 и У-70. На времени запуска и исследований синхротрона У-70 (суммарно 6 суток) были настроены режимы быстрого вывода при полных энергиях протонов 50 и 60 ГэВ и длительности основного плато 0.4 с. Проведены исследования вывода пучка с использованием станций кристаллических дефлекторов СКД-19 и СКД-25.

На времени физической программы пучок протонов двумя последовательными быстрыми выводами выводился на установки ПРГК-100 и НЕЙТРОН (рисунок 7). Исследования проводились при энергиях протонов 50 и 60 ГэВ. Длительности основного плато 0.4 с. Средняя интенсивность в сгустке $2.8 \cdot 10^{11}$ протонов, а максимальная $3.2 \cdot 10^{11}$ протонов.

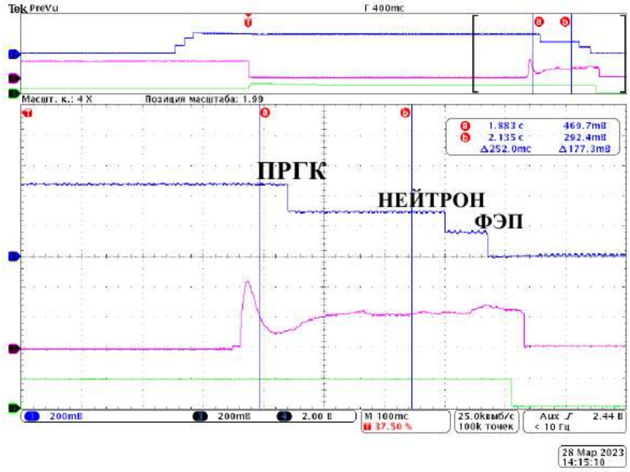


Рисунок 7: Последовательный вывод пучка на установки ПРГК-100 и НЕЙТРОН (лучи сверху вниз: сигнал индукционного датчика тока пучка, сигнал стабилизации магнитного поля - ΔH, Σ суммарная огибающая амплитуды ВЧ).

В ионной моде после запуска и настройки пучок энергиями 455, 400, 300 и 200 МэВ на нуклон использовался командой из 4-х институтов перечисленных в пятой колонке таблицы 1.

МОДЕРНИЗАЦИИ

Модернизации в основном коснулись инжекционного комплекса. На ускорителе УРАЛ-30 введен в опытную эксплуатацию мощный транзисторный ВЧ усилителя (148.500 МГц, 15 кВт) в качестве замены каскада на лампах ГИ-39Б. На ускорителе У-1.5 изготовлен и протестирован генератор возбуждения для систем питания импульсных и ударных магнитов на базе тиратронов с холодным катодом типа ТПИ-10к/75.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ускорительный комплекс У-70 НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ продолжает работы по программе фундаментальных и прикладных исследований и успешно провел четыре сеанса работы (Таблица 2) со времени предыдущей конференции RuPAC-2021.

Таблица 1: Внешние потребители углеродного пучка

Институт	2021-2	2022-1	2022-2	2023-1
МРНЦ, https://new.nmicr.ru/mrrc/	+	+	+	+
ИТЭБ РАН, https://iteb.ru/	+	+	+	+
ГНЦ РФ ИМБП РАН, http://www.imbp.ru/	+	+	+	+
НМИЦПН, https://serbsky.ru/		+	+	
ИАТЭ НИЯУ МИФИ, https://mephi.ru/		+	+	
НИ ТПУ https://tpu.ru/		+	+	+
ИМБ РАН, https://eimb.ru/		+	+	
МГУ https://www.msu.ru/		+	+	

Таблица 2: Четыре сеанса работы У-70 между RuPAC-2021 и RuPAC-2023

Сеанс	2021-2	2022-1	2022-2	2023-1
Последовательный запуск ускорителей УРАЛ-30, У-1.5 и У-70 (И-100 запускался параллельно с задержкой	04 Октября	01 Марта	18 Октября	01 Марта
Пучок в У-70.	25 Октября	21 Марта	10 Ноября	20 Марта
Программа экспериментальной физики (fixed-target) с выведенными пучками высоких энергий.	01 Ноября ÷ 15 Декабря, 44 дня	25 Марта÷ 11 Апреля 17 дней	17 Ноября ÷16 Декабря 29 дней	27 Марта ÷ 05 Апреля 10 дней

Число потребителей пучка (Физические установки)	9	9	9	2
Исследования ускорителей, физики и техники пучков заряженных частиц, дней	20	17	23	19
Ионная программа, только промежуточная энергия.	15÷29 Декабря 14 дней	11 ÷ 30 Апреля 19 дней	16÷30 Декабря, 14 дней	04÷19 Апреля, 12 дней

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] С.В. Иванов, О.П. Лебедев, “Стохастический вывод из У-70”. *Новости и проблемы фундаментальной физики, 2009, Т. 2(6), с.5-25.*

[2] Ю.М. Антипов, Г.И. Бритвич, С.В. Иванов, В.А. Калинин, О.П. Лебедев, Э.А. Людмирский, А.В. Максимов, А.В. Минченко, А.П Солдатов, Г.В. Хитев “Медленный вывод пучка ядер углерода из синхротрона У-70”. *ПТЭ, 2021, № 3, с.5-14.*

ДИНАМИКА ПУЧКА В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ ДЛЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ MSC230.

Г.А. Карамышева, С.В.Гурский, О.В.Карамышев, Т.В. Карамышева, Д.В.Попов, В.А. Малинин, И.Д.Ляпин ОИЯИ, Дубна, Россия

Аннотация

Представлены результаты трассировки пучка протонов, начиная от источника ионов до вывода из циклотрона MSC230[1], предназначеного для медико-биологических исследований. В расчетах движения частиц использовались результаты компьютерного моделирования ускоряющей и магнитной систем в программе CST studio в виде трехмерных карт ускоряющего поля (электродинамический расчет, отдельно электрическое и магнитное) и поля магнитной системы (режим магнитостатики).

ВВЕДЕНИЕ

Недавние исследования нового многообещающего метода протонной терапии, получившего название FLASH [2-3], показали, что он имеет большой потенциал для расширения применения протонной терапии на опухолях, которые ранее нельзя было лечить протонами, одновременно значительно улучшая эффективность и качество лечения. По сравнению с лучевой терапией при обычной мощности дозы (1–7 Гр/мин), FLASH-облучение проводится при мощности дозы более 50 Гр/с менее чем за 0,5 секунды. Здоровые ткани лучше противостоят FLASH-облучению, при этом уровень поражения опухоли такой же, как и при традиционном лечении.

Однако, прежде чем протонную FLASH-терапию можно будет полностью реализовать на практике, необходимо решить ряд инженерно-технических задач. В частности, необходим ускоритель, обеспечивающий высокий средний ток пучка, который, по разным оценкам [3] должен составлять 0,5-100 мкА для всего диапазона энергий, используемых при лечении.

Задача исследования FLASH делает актуальным создание в ОИЯИ научно-инновационного центра, оснащенного современным ускорителем протонов, системой доставки пучков и лабораторным оборудованием для биомедицинских исследований.

Изохронный циклотрон ускоряет квазинепрерывный пучок, поэтому является наиболее перспективным типом ускорителя для получения пучка высокой интенсивности. Мы планируем получить ток пучка около 10 мкА в коротком импульсе с энергией 230 МэВ в циклотроне MSC230, что достаточно для изучения эффективности метода FLASH.

Параметры циклотрона MSC230 можно посмотреть в работе [1].

ВИРТУАЛЬНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ЦИКЛОТРОНА

Виртуальное прототипирование (ВП) — это метод проектирования, основанный на технологиях САПР (CAD). В отличие от классического подхода к проектированию, при котором сначала разрабатываются все компоненты объекта по отдельности, которые затем соединяются за несколько итераций, виртуальное прототипирование предполагает работу с прототипом всего изделия, начиная с ранних этапов разработки и до его окончания. Для внедрения в практику разработки циклотронов метода виртуального прототипирования нами была создана на базе Matlab платформа, инкапсулирующая распределенные компоненты ВП и обеспечивающая механизм их взаимодействия. Основные компоненты ВП, применяемые нами для разработки циклотрона это CAD (Solidworks), различные модули CST Studio, а также программы анализа и трассировки, созданные нами в Matlab ранее, оптимизированные и адаптированные под новые задачи сейчас.

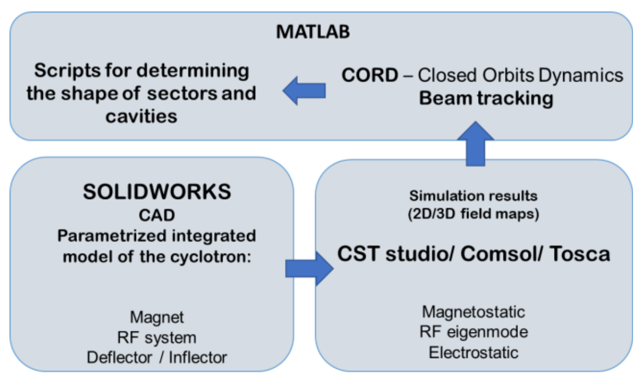


Рисунок 1: Схема Matlab платформы ВП циклотрона.

Непосредственно в Matlab выбираются основные параметры будущего циклотрона, формы секторов магнита и ускоряющих резонаторов, далее в CAD (Solidworks) создается параметризованная модель циклотрона на основе выбранных данных, затем предложенные отдельные системы отправляются в CST Studio для расчета в соответствующих модулях, а результаты расчетов из CST импортируются в Matlab, где они обрабатываются с помощью программы анализа на равновесных орбитах CORD (Closed ORbit Dynamics) [4], а на этапе разработки центральной области и вывода тестируются при помощи программ трассировки пучка.

Таким образом, в проектировании циклотрона важную роль играет умение разработчиков создавать модели, расчитывать электромагнитное поле отдельных систем, а также анализировать полученные результаты предложенных моделей, как правило, при помощи программ, созданных самими разработчиками.

Основные программы динамики пучка, необходимые для разработки циклотрона включают в себя возможность анализа движения на замкнутых равновесных орбитах и трассировки пучка (интегрирование системы дифференциальных уравнений движения). Так как измерения магнитного поля осуществляют только в медианной плоскости, на этапе формирования магнитного поля важно иметь подпрограмму корректного пересчета магнитного поля вне медианной плоскости.

АНАЛИЗ КАРТ ЭЛЕКТРО-МАГНИТНОГО ПОЛЯ

CORD (Closed ORbit Dynamics) - это программа для анализа карт магнитного и ускоряющего полей на равновесных замкнутых орбитах. Программа позволяет получить информацию о среднем и изохронном поле, низших и кратных структуре магнита гармониках, частоте обращения частиц в зависимости от радиуса, частотах бетатронных колебаний. Анализ ускоряющего поля предоставляет информацию об азимутальной протяженности резонаторов, распределении ускоряющего напряжения вдоль радиуса, максимальном наборе энергии на обороте, шаге орбит, количестве оборотов, расчитать фазовое движение центральной частицы. В качестве примера на рисунках ниже показаны: рабочая диаграмма (Рис.2), отклонение среднего поля от изохронного (Рис.3) и фазовое движение центральной частицы (Рис.4).

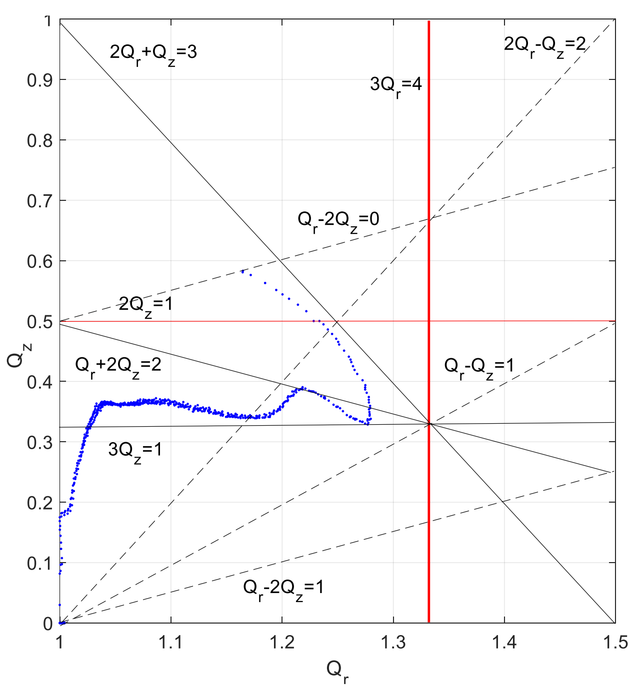


Рисунок 2: Диаграмма бетатронных частот.

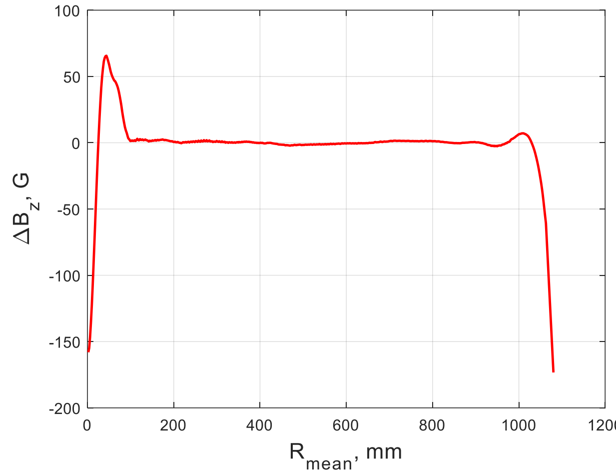


Рисунок 3: Отклонение среднего поля от изохронного.

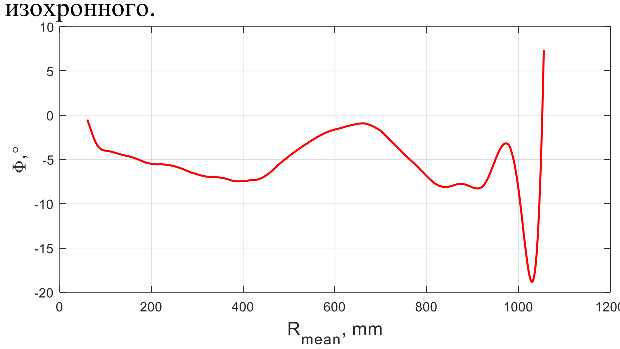


Рисунок 4: Фазовое движение центральной частицы.

Анализа карт электромагнитного поля на равновесных орбитах достаточно для выбора структуры магнита (размеров и формы секторов, среднего поля) и геометрии резонаторов с требуемой частотой и зависимостью напряжения вдоль радиуса. Для проектирования центральной области циклотрона и разработки системы вывода из циклотрона необходимо проводить расчеты трассировки пучка.

РАСЧЕТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

В расчетах процесса динамики пучка в зоне ускорения, как правило, применяют карты электрического поля, полученные в результате расчета высокочастотных резонаторов (например, в eigenmode модуле CST studio), что особенно необходимо при проектировании циклотронов со спиральной формой секторов и резонаторов, что связано, прежде всего с наличием сильной вариации ускоряющего напряжения вдоль радиуса. Однако, для расчета центральной области циклотрона, традиционно применяют электростатический подход, аргументируя это тем, что при электростатическом подходе можно задать более мелкую сетку. Мы решили сравнить оба подхода при расчете центральной области циклотрона MSC230.

Первое, что мы обнаружили - это существенное отличие в ускоряющем напряжении на первом зазоре между источником и пулером. Напряжение в электростатическом расчете оказалось заметно выше, чем в ВЧ расчете (см. Рис.5).

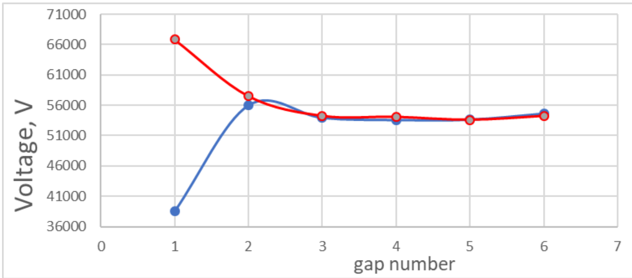


Рисунок 5: Ускоряющее напряжение в зависимости от номера зазора (в медианной плоскости). Красная линия-электростатика, синяя линия- электродинамика.

Более низкое значение напряжения в результате ВЧ расчета легко объяснить, если посмотреть на токи на поверхности источника, индуцируемые высокочастотным полем (см. Рис.6). Очевидно, что уменьшение напряжения на первом ускоряющем зазоре связано с энергией, затраченной на индукционный ток.

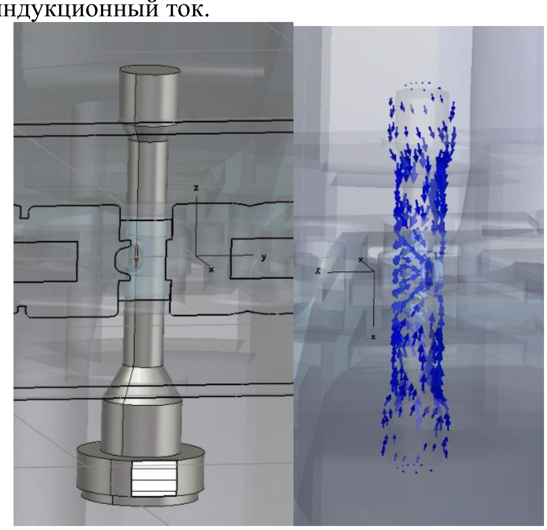


Рисунок 6: Модель источника и токи, индуцируемые на поверхности источника.

Оптимизацию геометрии центральной области мы проводили, расчитывая ускоряющее поле в результате электродинамического расчета резонатора.

В самом центре циклотрона пучок, как правило, дефокусируется по вертикали в сильно растущем вдоль радиуса магнитном поле. В циклотроне MSC230 вертикальная магнитная фокусировка начинается от 40 мм [5], радиуса начала второго оборота (см. Рис.7). Вертикальная фокусировка пучка при движении в течении первого оборота обеспечивается для запаздывающих частиц за счет дейсвия электрического поля.

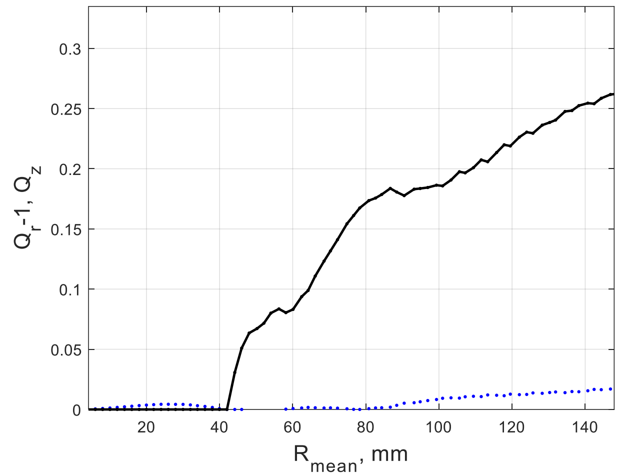


Рисунок 7: Частоты бетатронных колебаний в центральной области. Черная сплошная линия- частота вертикальных бетатронных колебаний, синие точки - частота радиальных колебаний Q_r-1.

Центральная область циклотрона на энергию 230 МэВ должна сформировать пучок с ограниченными амплитудами бетатронных колебаний (до 5 мм) и хорошим центрированием (не хуже 1 мм).

При расчете динамики пучка мы использовали 3D карты, полученные в результате расчета ускоряющей системы в электростатическом приближении и в eigenmode модуле CST studio, магнита - в CST модуле magnetostatic. Расчет производился для 10000 частиц, вылетающих из источника с фазовой протяженностью 180 градусов. При перерасчете эффективности захвата в ускорение учитывалось, что еще столько же частиц потеряно для ускорения.

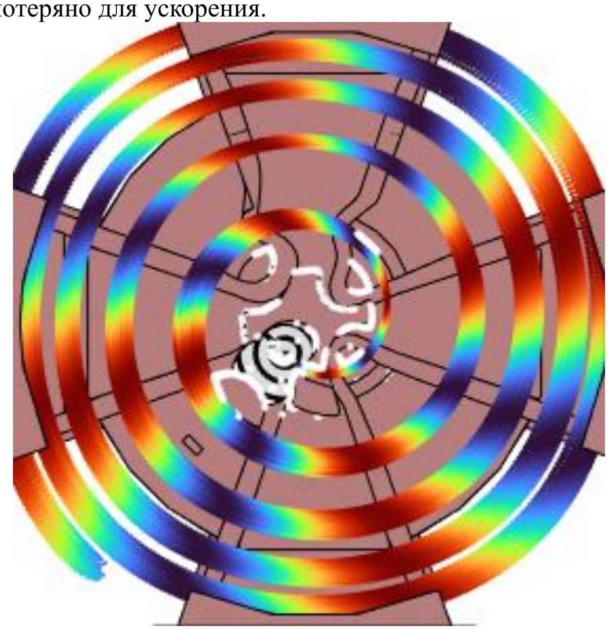


Рисунок 8: Траектории пучка в центральной области. Цвет траекторий отражает фазу колебаний электромагнитного поля ускоряющей системы.

На рисунке 8 белыми точками показаны места столкновений протонов с элементами структуры циклотрона, то есть положение потерь.

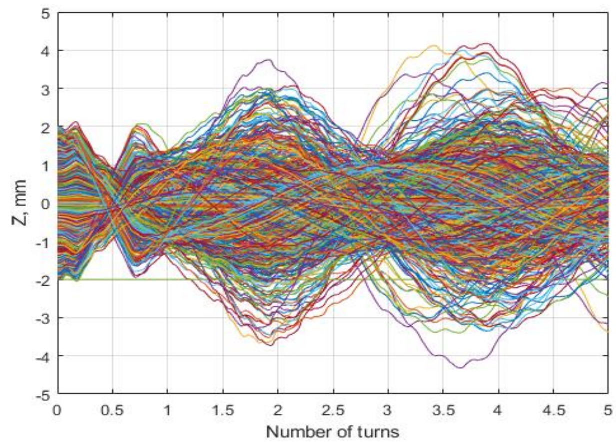


Рисунок 9: Вертикальное движение пучка в зависимости от номера оборота.

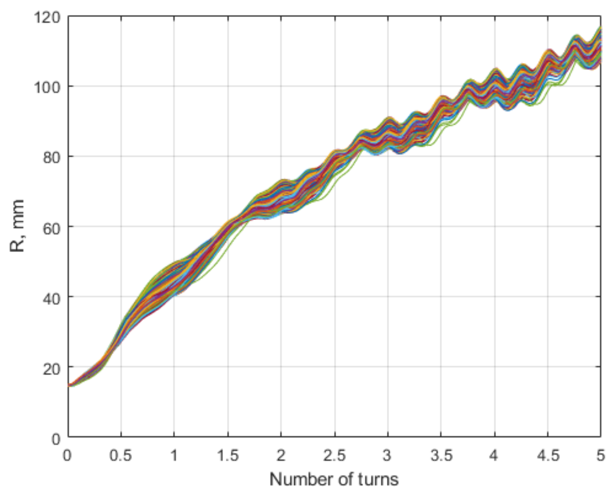


Рисунок 10: Радиальное движение пучка.

Эффективность захвата в ускорение в сформированной геометрии центральной области при высокочастотном расчете ускоряющего поля составляет около 10%, при расчете динамики пучка в картах, полученных в результате электростатического анализа эффективность захвата существенно ниже - около 3%.

Наиболее важной характеристикой пучка на выходе из центральной зоны является амплитуда радиальных бетатронных колебаний частиц. По величине амплитуд радиальных колебаний частиц можно судить о степени центрированности пучка.

На рисунке 11а,б представлены гистограммы распределения радиальных амплитуд частиц, захваченных в ускорение на протяжении 5 оборотов.

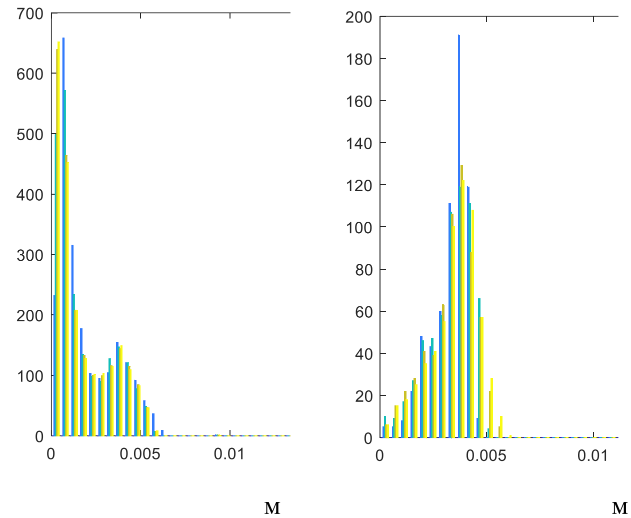


Рисунок 11: а)Гистограмма амплитуд радиальных колебаний (2270 частиц из 10000, ВЧ анализ, слева), б) гистограмма амплитуд радиальных колебаний (660 частиц из 10000, электростатическое приближение, справа).

Видно хорошее центрирование пучка в картах поля, полученных в результате ВЧ анализа, расчет в картах электростатического приближения демонстрирует максимум количества частиц с амплитудами около 4 мм.

Очевидно, что для оптимизации центральной области необходимо использовать карты ускоряющего поля, полученные в результате ВЧ анализа, в противном случае, систематическая ошибка в виде нереалистичного напряжения на первом зазоре сводит на нет преимущество мелкой сетки электростатического расчета.

Прецизионный расчет динамики пучка, казалось бы, позволяет сформировать центральную область таким образом, чтобы обеспечить хорошее центрирование пучка, однако во время пусконаладочных работ хорошее центрирование пучка достигается при помощи корретирующих обмоток или стержней. Различие в результатах расчета динамики пучка при применении карт из электростатического расчета и карт, полученных в eigenmode модуле CST, объясняет причину необходимости последующей коррекции орбиты.

ТРАССИРОВКА ПУЧКА В ЗОНЕ УСКОРЕНИЯ

Известно, что в циклотронах со спиральной формой ускоряющих резонаторов возможно влияние магнитного поля ускоряющей системы на движение пучка. В циклотроне MSC230 азимутальная ширина резонаторов в зоне вывода составляет около 27 градусов, что существенно меньше оптимальной для четвертой кратности ускорения. Поэтому важно оценить величину возможного влияния магнитного поля ускоряющей системы на движение пучка. Для проведения такой оценки в расчете ускорения пучка использовали карту магнитного поля ускоряющей системы, показанную на Рисунке 12.

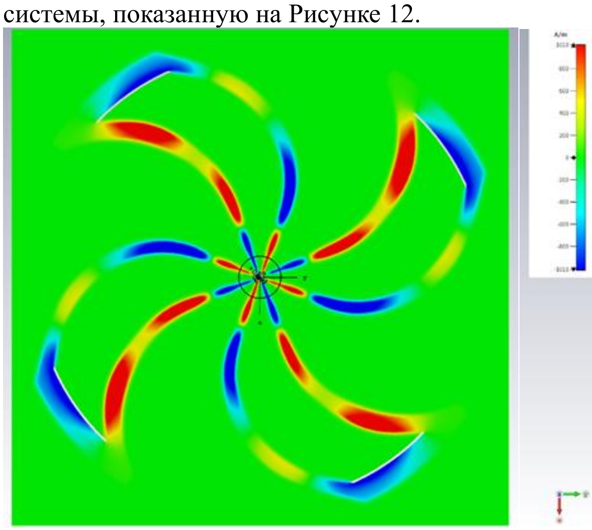


Рисунок 12: Распределение магнитного поля ускоряющей системы.

На Рисунке 13 показано фазовое движение пучка в процессе ускорения без учета магнитного поля резонатора (красный цвет) и с учетом магнитного поля (желтый цвет). В зоне вывода наблюдается небольшое влияние магнитного поля ускоряющей системы в виде изменения на ~5 градусов ВЧ, также прослеживается эффект фазовой компрессии. Сдвиг фазы, вызванный действием магнитного поля ускоряющей системы невелик, однако, им нельзя пренебречь при формировании магнитного поля циклотрона.

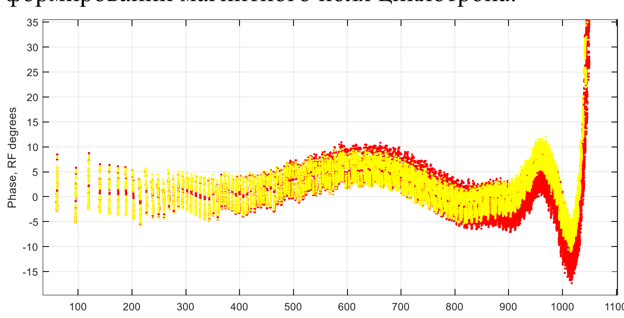


Рисунок 13: Фазовое движение пучка в процессе ускорения с учетом (желтый цвет) и без учета магнитного поля ускоряющей системы.

ВЫВОД ПУЧКА

Низкое магнитное поле в сочетании с высоким темпом ускорения за счет 4-х резонаторов и режима работы на четвертой кратности позволит эффективно вывести пучок с помощью электростатического дефлектора (ЭСД), расположенного между секторами, и 2-х пассивных фокусирующих магнитных каналов [6]. Электрическое поле в дефлекторе мы ограничили величиной 100 кВ/см.

Пучок, отклоненный дефлектором, проходит через ускоряющие ВЧ-резонаторы и магнитные каналы. Пассивные магнитные каналы расположены между секторами, первый уменьшает среднее магнитное поле на 2000 Гс и обеспечивает градиент 1000 Гс/см, второй обеспечивает градиент 1700 Гс/см.

Расчетный горизонтальный эмиттанс на выходе из ускорителя составляет около 8π•мм•мрад, а вертикальный — около 2π•мм•мрад.

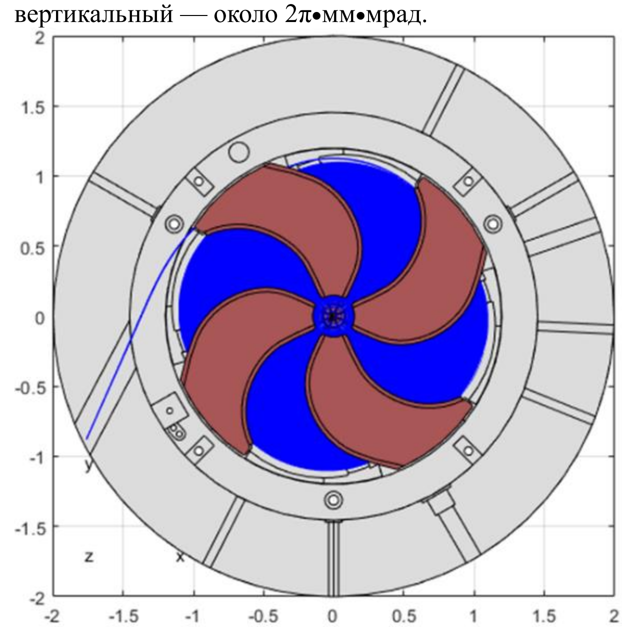


Рисунок 14: Трассировка пучка от источника до выхода из циклотрона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка циклотрона MSC230 осуществлялась с применением современных методов моделирования, опираясь на результаты расчетов систем циклотрона в соответствующих модулях CST studio. Показана недопустимость расчетов ускоряющего поля в режиме электростатики, как для центральной области, так и для зоны ускорения.

REFERENCES

[1] O.Karamyshev et al., “Research and Development of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy”, Phys. Part. Nucl. Lett. Vol. 18, no. 1, pp. 63-74, 2021.

[2] A.Patriarca, “FLASH Radiation Therapy: Accelerator Aspects”, in Proc. 11th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2020, Caen, France.

[3] S.Jolly et al., “Technical Challenges for FLASH Proton Therapy”, in Proc. International Conference on Medical Accelerators and Particle Therapy, Seville, Spain 2019.

[4] O.Karamyshev et al., ‘CORD (Closed Orbit Dynamics): A New Field Map Evaluation Tool for Cyclotron Particle Dynamics’ // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2021. Vol. 18, No. 4, Pp. 481– 487.

[5] V.Malinin, “The design of the center region of MSC230 cyclotron”, THBO06, 23rd International Conference on Cyclotrons and their Applications, 2022, Beijing, China.

[6] D.Popov “Beam extraction simulation and magnetic channels' design for MSC230 Cyclotron”, THAO02 , 23rd International Conference on Cyclotrons and their Applications, 2022, Beijing, China.

ОПТИМИЗАЦИЯ УНИКАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ “УНУ-ЭЛВ 6” С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ МОЩНОСТИ ДО 100 КВТ И ПРОВОДИМЫЕ ЭКСПЕРЕМЕНТЫ ПО ПОЛУЧЕНИЮ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ НА ЭНЕРГИИ 1,4-2,5 МЭВ**

Е.В. Домаров, Д.С. Воробьев, М.Г. Голковский, Ю.И. Голубенко, А.И. Корчагин,
Н.К. Куксанов, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев, И.К. Чакин
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

Аннотация

Приведен обзор работ по модернизации экспериментальной установки на базе промышленного ускорителя электронов с выводом сфокусированного электронного пучка в атмосферу. Установка имеет статус Уникальной научной установки Российской Федерации УНУ Стенд ЭЛВ-6. Реконструкция позволила перейти от бывшей в употреблении ускорительной трубки сложной конструкции с магнитным сопровождением пучка на более простую широкоапертурную трубку, серийно выпускаемую в ИЯФ СО РАН. Описана новая конструкцию устройства вывода электронного пучка в диапазоне энергий 1,4 – 2,5 МэВ в атмосферу, а также разработка технологических приложений сфокусированного электронного пучка.

Ранее в ИЯФ СО РАН для исследования различных технологических применений функционировала уникальная научная установка (УНУ ЭЛВ-6), с выпускным устройством способным выводить в атмосферу сфокусированный электронный пучок с энергией до 1,4 МэВ [1]. В ней использовалась ускорительная трубка с магнитным сопровождением электронного пучка. Магнитное сопровождение обеспечивается линзами на постоянных магнитах, установленных внутри ускорительной трубки.

В настоящее время в ускорителях ЭЛВ используются более простые и надежные ускорительные трубки без магнитного сопровождения. Они имеют относительно большую апертуру - 100 мм и изготовляются серийно. Учитывая высокую надежность серийных ускорительных трубок, а также утерю технологии изготовления трубок с магнитным сопровождением, на ускорителе ЭЛВ-4 была исследована динамика пучка в ускорительной трубке с большой апертурой. Длина ускорительной трубки составляет 1800 мм, конструкция её приведена на рис. 1.

В 2017 были проведены измерения диаметра пучка на выходе из ускорительной трубки с большой апертурой. Он составил 9 мм при токе пучка 66 мА, а угол расходимости пучка - $7 \cdot 10^{-3}$ рад. В дальнейшем был произведен выбор оптической схемы выпускного устройства, которая показана на рис. 2. [2].

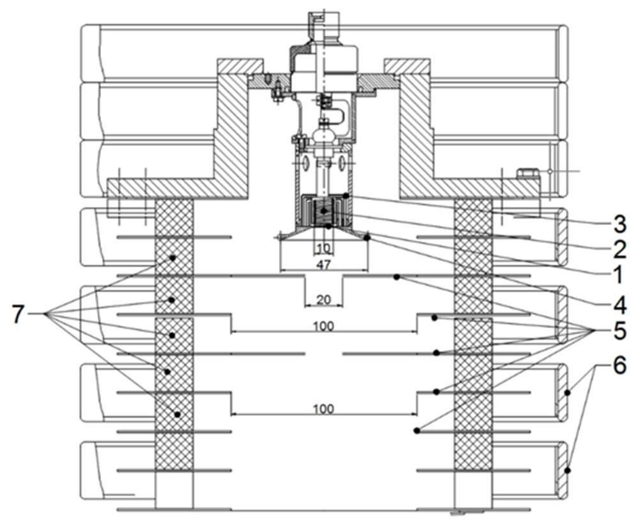


Рисунок 1. Прикатодная часть ускорительной трубки 1 – катод; 2 - подогреватель катода; 3 – тепловые экраны; 4 – прикатодный электрод; 5 – электроды ускорительной трубки; 6 – экранирующие кольца; 7 – керамический изолятор.

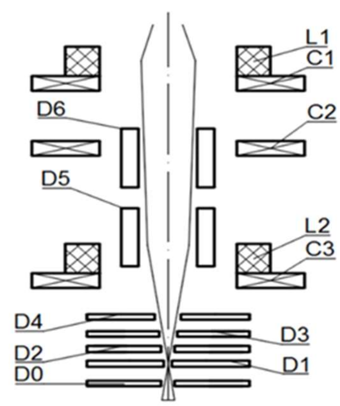


Рисунок 2. Оптическая схема выпускного устройства.

На рис. 2 обозначены: D0 – Дополнительная ступень с диаметром отверстия 5мм; D1- диафрагма с отверстием диаметром 2 мм; D2- диафрагма с отверстием диаметром 2.5 мм: D3- диафрагма с отверстием диаметром 3.5 мм; D4 - диафрагма с отверстием диамет-

* E.V.Domarov@inp.nsk.su

ром 4 мм; D5- водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 10мм; D6- водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 12мм. C1, C2, C3- катушки коррекции; L1, L2 – фокусирующие электромагнитные линзы.

Отдельно была сконструирована новая малогабаритная вакуумная коробка выпуска пучка, содержащая 4 финальные ступени выпуска пучка. Основным узлом коробки выпуска является медный корпус (рис. 3), в котором располагается четыре ступени дифференциальной откачки, разделенные диафрагмами.

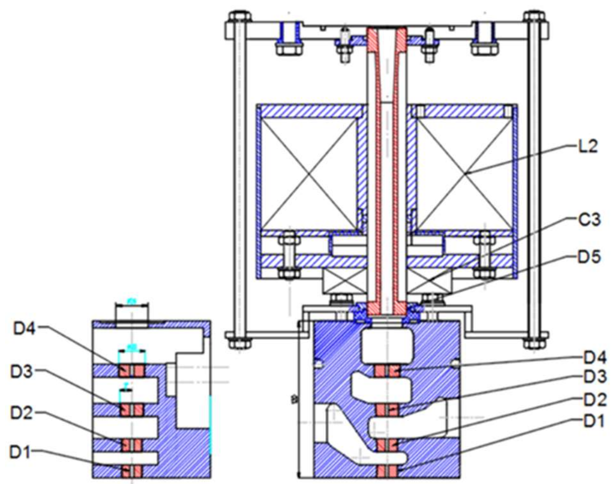


Рисунок 3 Общий вид основного узла выпускного устройства. D1, D2, D3, D4 –диафрагмы с отверстиями 2,5; 3; 4 и 4,5 мм соответственно; D5- водоохлаждаемая диафрагма с отверстием диаметром 10 мм и длиной 200 мм; L2 – электромагнитная фокусирующая линза с постоянными магнитами; C3- катушки коррекции.

Размер отверстий в диафрагмах установлен в соответствии с расчетным значением огибающей пучка. Для этих диаметров отверстий были вычислены натекания воздуха и выбраны насосы для дифференциальной системы откачки, которые обеспечивают возможность получить перепад давлений с атмосферного до 10^{-6} Торр в ускорительной трубке. Линза и катушки коррекции находятся вне вакуумной камеры. Диафрагма D5 охлаждается водой по трубке, впаянной в корпус диафрагмы и рассчитана на снятие мощности порядка 1-1,5 кВт. Она изолирована вставками из капролона. Диафрагмы D1, D2, D3, D4 охлаждаются за счет непосредственного контакта с медным водоохлаждаемым корпусом коробки выпуска. Контролировать отдельно ток каждой из диафрагм D1-D4 не представляется возможным, поскольку они имеют электрический контакт с корпусом. Сам корпус коробки выпуска изолирован от земли, ток на него равен суммарному току оседания на диафрагмы D1-D4. Охлаждение корпуса позволяет снять мощность до 1-2 кВт, при условии, что каждая из четырех диафрагм принимает мощность до 0,5 кВт [3]. Для увеличения срока службы насосов и уменьшения количества пыли, которая летит в вакуумные камеры при производстве нанопорошков, была установлена дополнительная вакуумная камера с водокольцевым наносом. Диметр отверстия во входной диафрагме этой ступени составляет 5 мм.

Общий вид выпускного устройства, которое эксплуатируется на УНУ- ЭЛВ-6, показан на рис. 4.

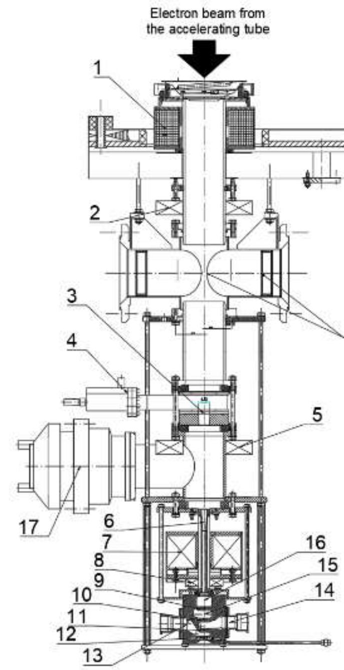


Рисунок 4. Общий вид выпускного устройства: 1 – верхняя линза L1; 2 – верхние коррекции C1; 3 – водоохлаждаемая диафрагма диаметром 7 мм D6; 4- шибер ; 5- средние катушки коррекций C2; 6 – водоохлаждаемая диафрагма с диаметром отверстия – 10 мм D5; 7 – нижняя линза L2; 8- нижние коррекции C3; 9- диафрагма с диаметром отверстия 4 мм D4; 10- диафрагма с диаметром отверстия 3.5 мм D3: 11- диафрагма с диаметром отверстия 2.5 мм D2; 12 – диафрагма с диаметром отверстия 2 мм D1; 13 – первая ступень дифференциальной откачки (насос АВЗ-90) 14 – вторая ступень дифференциальной откачки (насос АВЗ-90); 15 – третья ступень (насос РУТС 150 + АВЗ-20); 16 – четвертая ступень (турбомолекулярный насос НВТ-450); 17 – пятая ступень турбомолекулярный насос НВТ-450); 18 – шестая ступень (два НМД-0,4).

Это выпускное устройство работало на энергии 1,4 МэВ, однако для многих технологических процессов требуемый диапазон энергий составляет от 1,4 МэВ до 2,5 МэВ. По этой причине была произведена замена ускорителя ЭЛВ-6 с максимальной энергией 1,4 МэВ, на ускоритель ЭЛВ-8 с максимальной энергией 2,5 МэВ. Предварительно провели анализ динамики пучка в ускорительной трубке с большой апертурой длиной 2700 мм.

Расчеты проводились с помощью программы WInSAM разработанной в ИЯФ СО РАН [4]: учитывалось влияние собственного магнитного поля спирали накала катода, проверялось влияние потенциала электродов № 2 и 4 на параметры пучка, формы заделки таблетки LaB6 и формы прикатодного электрода. Распределение потенциала вдоль ускорительной трубки выбиралось с учетом опыта эксплуатации ускорителя УНУ ЭЛВ-6. В ходе эксплуатации ускорителя было установлено, что оптимальное прохождение электронного пучка через систему диафрагм обеспечивается, когда напряжение на электроде №2 составляет 6 кВ.

После замены ускорителя с ЭЛВ-6 на ЭЛВ-8 устройство для вывода в атмосферу сфокусированного электронного пучка, общий вид которого приведен на рис. 4, было испытано на нём.

Система дифференциальной откачки адаптирована к выбранной электронно-оптической схеме устройства. В ходе испытаний была достигнута устойчивая работа на мощности пучка 70 кВт, при энергиях пучка от 1,4 МэВ до 2,5 МэВ. Кратковременно в течении 1 часа был выпущен пучок мощностью 100 кВт на энергии 2,0 МэВ.

В настоящие время ускоритель ЭЛВ-8 с новым выпускным устройством используется в ИЯФ СО РАН для отработки технологий по следующим направлениям: получение нанопорошков разных материалов, наплавка упрочняющих покрытий на металлические основы, синтез керамик различного назначения. Требуемая плотность мощности для технологических применений составляет 1-50 кВт/см2 в диапазоне энергий от 1,4 до 2,5 МэВ.

Для отработки технологии получения нанопорошка оксида кремния используется полупромышленная установка, упрощённая схема которой показана на рис. 6.

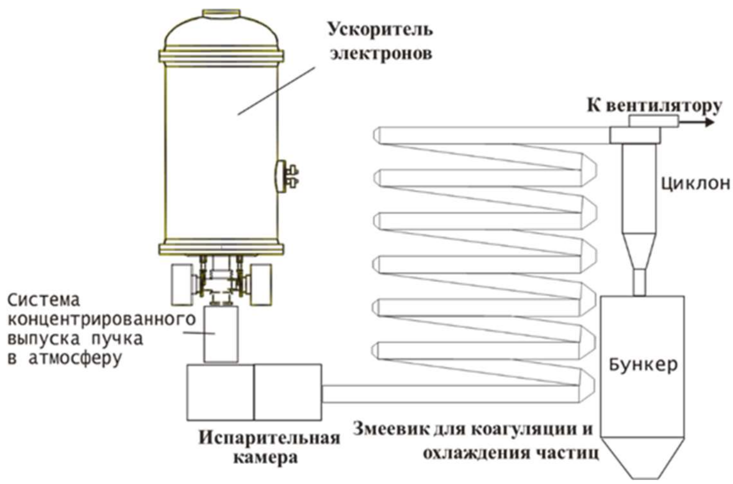


Рисунок 5. Установка для получения оксида кремния.

В состав установки входят: ускоритель электронов ЭЛВ-8, оборудованный устройством выпуска сфокусированного электронного пучка в атмосферу; испарительная камера; охладитель - коагулятор; 2 циклона с бункерами и вентиляторами; рукавный фильтр, на котором собирается самая мелкая фракция нанопорошка, также снабжённый вентилятором, выбрасывающим воздушный поток в атмосферу (часть из перечисленного оборудования на рис. 5 не показана). В настоящие время была получена производительность оксида кремния 5кг/ч, при энергии пучка 2,0 МэВ и мощности 80 кВт. Удельная поверхность нанопоршка составила 50 м^2/г. [5]. В дальнейшем планируется увеличить производительность до 11 кг/ч, а удельную поверхность нанопорошка довести до 150 м^2/г.

Для получения нанопорошков тугоплавких оксидов используется высокотемпературный испаритель, эскиз которого приведен на рис. 6. В тигель, выполненный из графита засыпается испаряемый материал. Расстояние от материала до выпускного устройства составляет 10-15 см. Стенки камеры охлаждаются водой.

Для того, чтобы не перегреть медный кубик выпускного устройства, т.к. выпускное устройство расположено близко к испаряемому материалу, и уменьшить попадание наночастиц в первую ступень выпускного устройства, под выпускным устройством помещаются две дополнительные камеры. В них подается сжатый воздух как показано на рисунке 6. Испаряемый материал нагревается сфокусированным пучком электронов с энергией от 1,4 до 2,5 МэВ. Параметры пучка выбираются в зависимости от получаемого материала. В частности, были получены оксид иттрия с производительностью 100 г/ч при энергии электронов 1,4 МэВ и мощности 60 кВт, оксид цинка и оксид висмута с производительностью 1 кг/ч при энергии 1,4 МэВ и мощности 10 кВт [6].

Выведенный в атмосферу сфокусированный электронный пучок ускорителей серии ЭЛВ позволяет производить поверхностную закалку стальных изделий плоской и цилиндрической формы, а также наплавку различных материалов на плоские поверхности чёрных и цветных металлов. Эффективная глубина проникновения в металл ускоренных электронов в диапазоне энергий 1...1,5 МэВ часто сопоставима с требуемой глубиной закаленного слоя. Использование устройств, обеспечивающих сканирование электронным пучком в воздухе, позволяет значительно увеличить площади обрабатываемых изделий и повысить производительность процесса.

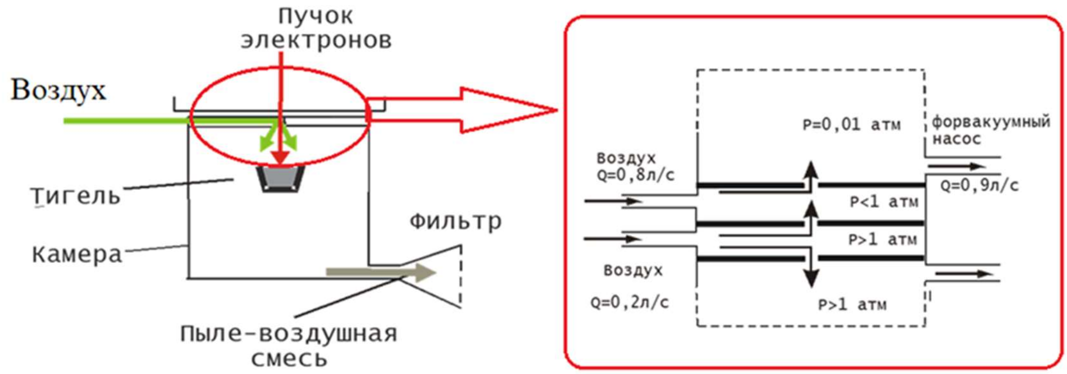


Рисунок 6. Высокотемпературный испаритель.

Схема закалки плоских изделий показана на рис. 7. Сканирующий электронный пучок оставляет закалённую полосу на перемещающейся со скоростью V перпендикулярно к направлению сканирования детали. Ширина полосы, закаленной за один проход, может достигать 15 см.

В ИЯФ СО РАН была отработана технология закалки железнодорожных рельсов. Схема процесса закалки и образец обработанной делали показан на рисунке 8.

Закалка внутренней боковой поверхности рельса на криволинейных участках пути производилась для увеличения срока службы рельсов, поскольку на поворотах наблюдается преимущественный износ поверхности головки рельса. Закаленные электронным пучком рельсы прошли испытания в действующем пути Транссиба. Длина испытываемого участка на Восточносибирской железной дороге составляла 100 м. Испытания показали, что износ поверхности этих рельсов как минимум в 3 раза ниже по сравнению со стандартными объемно-закаленными рельсами, размещёнными на том же участке [7].

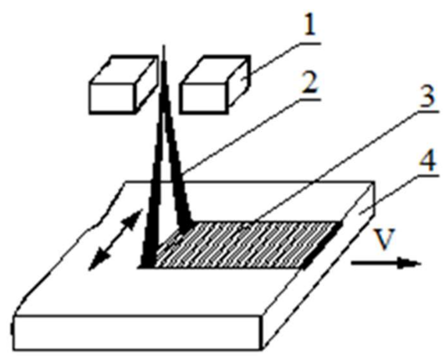
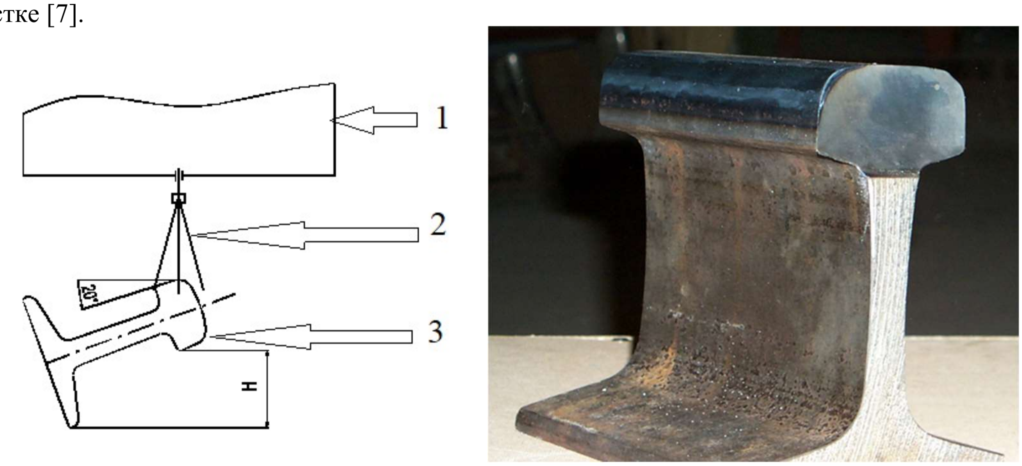


Рисунок 7. Схема закалки электронным пучком плоских деталей. 1 – полюса электромагнитной развёртки пучка; 2 - траектория сканирования пучка; 3 - закалённая полоса; 4 - закаливаемая деталь



а) б)

Рисунок 8. а) схема процесса закалки боковой поверхности рельса. 1 - выпускное устройство; 2 – сфокусированный электронный пучок; 3 – железнодорожный рельс. б) образец закаленного железнодорожного рельса.

Формирование модифицирующих покрытий на чёрных и цветных металлах производится по той же схеме, что и закалка плоских изделий (рис. 7), с тем лишь отличием, что на поверхность детали предварительно помещаются модифицирующие порошки. На поверхности можно наносить покрытия, обладающие повышенной твёрдостью и износостойкостью, химической, коррозионной и термостойкостью, либо сочетанием этих качеств. Для наплавки возможно использование разнообразных порошковых материалов с флюсующими добавками: карбиды, бориды, нитриды, нержавеющая сталь, интерметаллиды, а также ряд самофлюсующихся наплавочных порошков. В результате происходит перемешивание нанесенных на поверхность легирующих материалов с расплавленным материалом основы с получением в итоге поверхностного износостойкого слоя.

В ИЯФ СО РАН совместно с НГТУ отработана технология изготовления коррозионностойких покрытий на подложке из титана [8]. На рисунке 9 показана одна из пластин боковой стенки реактора с коррозионностойким покрытием системы Ti-Ta-Nb, изготовленным по данной технологии.

Изготовление керамических материалов из исходных порошковых смесей производится аналогично закалке и наплавке на плоские изделия, с тем лишь отличием, что исходный порошок для спекания помещается в массивный медный прямоугольный тигель с типичными размерами зоны облучения порошка 100×50 мм, глубиной соответствующей глубине проникновения пучка в материал.

Рисунок 9. Пластина боковой стенки коррозионностойкого реактора с отверстием для приварки танталовой трубы. Вид со стороны покрытия.

Ввиду краткости воздействия пучка (около 1 с) стехиометрический состав исходного порошка в результате обработки не меняется. Процесс спекания осуществляется прямым воздействием на шихту электронного пучка с энергией от 1,4 до 2,5 МэВ. Тигель обычно движется со скоростью 1 см/с в плоскости перпендикулярной плоскости сканирования пучка [13]. Образцы керамики после спекания показаны на рисунке 10.

Описанным способом получен целый ряд люминофорных материалов, по своим характеристикам приближающихся к промышленным образцам. Продолжительность спекания таких люминофоров составляет секунды, в то время, как процесс изготовления промышленных люминофоров составляет несколько суток [13].

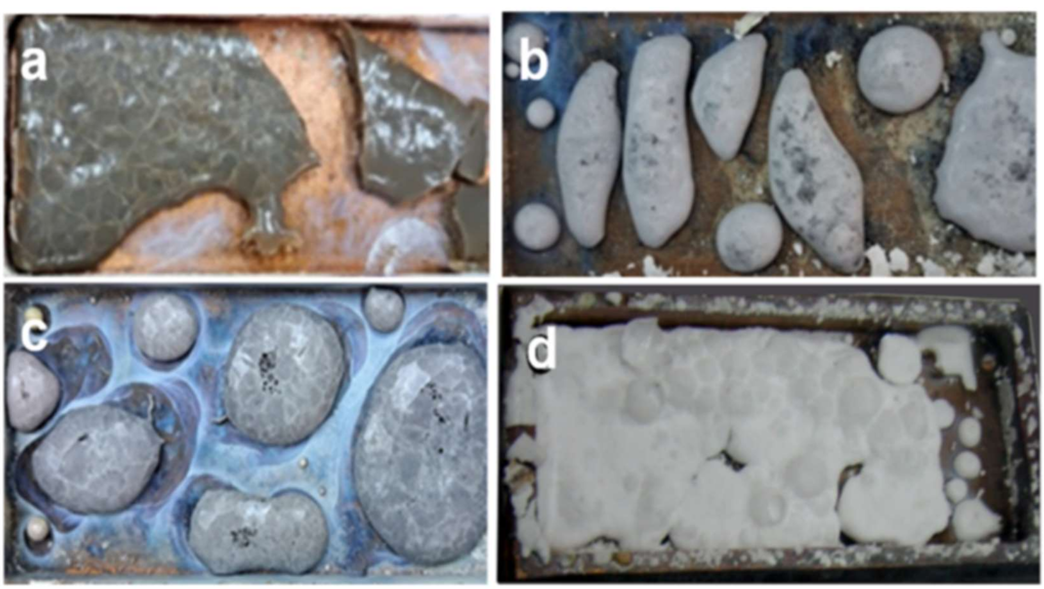


Рисунок 10. Вид синтезированных образцов в тиглях: BaF_2 (a), MgF_2 (б); $BaMgF_4$:W (c); $Ba_{0,5}\,Mg_{1,5}F_4$ (d).

В настоящие время с использованием установки УНУ Стенд ЭЛВ-6 выполняются следующие гранты РНФ:

1. “Высокоэнтропийные керамики, синтезированные методом нагрева быстрыми электронами на воздухе”. Руководитель проекта Гынгазов С.А., ТПУ СО РАН г Томск: https://rscf.ru/project/23-79-00014/

2.“Экспресс технология радиационного синтеза высокотемпературной оксидной керамики для фотоники”. Руководитель проекта Полисадова Е.Ф, ТПУ СО РАН г Томск: https://rscf.ru/project/23-73-00108/

3.“Разработка научных и технологических основ проектирования многофункциональных покрытий с использованием технологии наплавки мощным электронным пучком, выведенного в воздушную атмосферу”. Руководитель проекта Батаев В.А., НГТУ г Новосибирск: https://rscf.ru/project/23-79-00066/

ВЫВОДЫ

Отработавший свой ресурс промышленный ускоритель электронов ЭЛВ-6 с диапазоном энергии электронов до 1,4 МэВ был заменён на серийно выпускаемый ИЯФ СО РАН ускоритель ЭЛВ-8 с энергией электронов до 2,5 МэВ.

Разработана и прошла испытания новая система выпуска сфокусированного электронного пучка в атмосферу, способная обеспечить вывод пучка из серийно изготавливаемых ускорительных трубок без магнитного сопровождения в диапазоне энергий пучка 1 – 2,5 МэВ. Новая система выпуска обладает повышенной устойчивостью к пробоям и возможным другим отключениям тока пучка.

На УНУ ЭЛВ-6 отработан ряд потенциальных технологических применений сфокусированного электронного пучка, выведенного в среду с атмосферным давлением. Перспективными представляются технологии получения нанопорошков различных материалов, наплавки модифицирующих покрытий на металлы и синтеза керамик разного назначения из исходных порошковых смесей. В частности, таким способом получен ряд люминесцентных керамик различного состава.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ELV-6 accelerator, [online], https://ckp-rf.ru/catalog/usu/200984/

[2] Домаров Е. В., Воробьев Д. С., Голковский М. Г. И др. Исследование параметров мощного электронного пучка промышленного ускорителя ЭЛВ // Сиб. физ. журн. 2019. Т. 14, № 2. С. 5–20. DOI:10.25205/2541-9447-2019-14-2-5-20.

[3] Domarov E.V., Golubenko.Yu.I., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Fadeev S.N., Chakin I.K., Device for creating a pressure differential using differential pumping. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022. Vol. 63, №1, pp41-46 ISSN 0021-8944. DOI:10.1134/S0021894422010072

[4] A.V.Ivanov, M.A. Tiunov. ULTRASAM - 2D Code for Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision, Proc. 8th European Particle Accelerator Conference (EPAC 2002), Paris, France, 3-7 June 2002, p.1634-1636

[5] I.V. Chakin, E.V. Domarov, S.P. Bardakhanov, D.Yu. Trufanov, A.P. Zavyalov, K.V. Zobov Gas phase of nanopowder production through electron beam technology. XIX International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2018) Novosibirsk, 13–19 августа 2018

[6] Investigation of the effect of the type of starting material on the process of obtaining a yttrium oxide nanopowder by evaporation of a substance by a high-energy electron beam. Труфанов Д. Ю., Зобов К В., Бардаханов С. П., Гапоненко В. Р., Чакин И. К., Домаров Е. В. AIP Conference Proceedings, 2021.

[7] М.Г. Голковский, А.И. Корчагин, Н.К. Куксанов, А.В. Лаврухин, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев. Некоторые прикладные аспекты использования выведенного в атмосферу интенсивного сфокусированного электронного пучка // Наука производству, 2003, №7, с.18-22.

[8] M.G. Golkovski, I.A. Bataev, A.A. Bataev, A.A. Ruktuev, T.V. Zhuravina, N.K. Kuksanov, R.A.Salimov, V.A. Bataev. Materials Science and Engineering A578 310–317 (2013)

[9] Matts, O.E., Rashkovets, M.V., Domarov, E.V., Korchagin, A.I. Composite coatings over titanium alloy formed by non-vacuum electron beam cladding (2020) AIP Conference Proceedings, 2310, Conference Paper № 020198.

[10] Krylova, T.A., Chumakov, Yu.A., Domarov, E.V., Korchagin, A.I. Investigation of composite coatings based on the intermetallic matrix Ni_3Al with refractory WC inclusions. (2019) AIP Conference Proceedings, 2167, Conference Paper № 020185.

[11] Крылова Т.А., Чумаков Ю.А., Домаров Е.В., Корчагин А.И. Исследование возможности получения сплава "WC – Ni_3A1" при реализации электронно-лучевой наплавки вне вакуума // В книге: Международный междисциплинарный симпозиум "Иерархические материалы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций". Тезисы докладов International Workshop, Международной конференции и и VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию основания института химии нефти. 2019. С. 602. DOI: 10.17223/9785946218412/401.

[12] Крылова Т.А., Чумаков Ю.А., Домаров Е.В., Корчагин А.И. Фрактографический анализ разрушения композиционных покрытий после испытаний на изгиб // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 9 (741). С. 15-19. DOI: 10.17223/00213411/62/9/15

[13] Koketai T.A., Strelkova A.V., Zhunusbekov A.M., Karipbayev Zh.T., Lisitsyna L.A., Chakin A.M. Luminescent properties of BaxMg2-xF4:W ceramics. Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. 2023. Т. 7. № 1. С. 45-51

ELLIPTICAL ELECTROMAGNETIC UNDULATOR UE212M FOR THE STATION "ELECTRONIC STRUCTURE" IN THE SKIF PROJECT

D.S. Gurov, K.V. Zolotarev, V.V. Zuev, A.V. Utkin, V.G. Cheskidov
INP SB RAS, Institute of Nuclear Physics. G.I. Budker SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract

The UE212M elliptical electromagnetic undulator is designed to generate synchrotron radiation for the “Electronic Structure” station of the SKIF facility. The article describes the magnetic and mechanical structure of the undulator, its modes of operation and the parameters of the radiation it generates.

DESCRIPTION OF THE UNDULATOR

To generate radiation with different types of polarizations for the station of the first stage "Electronic Structure" in the project of the Siberian Ring Photon Source ("SKIF", [1]), an electromagnetic elliptical undulator UE212M was developed.

The main parameters of the undulator are presented in the following table 1.

Table 1: Basic parameters of undulator

Undulator period (λ_u)	212 mm
Number of regular periods	20
Total number of poles	46
Maximal value of vertical magnetic field (B_v)	0.49 T
Maximal value of horizontal magnetic field (B_h)	0.1 T
Pole gap (h)	19 mm
Total undulator length (L)	4864mm

The simulation of the magnetic field of the undulator was carried out using the program for magnetostatic calculations "Mermaid" [2], the calculations of SR from the undulator were carried out using the computer program "Spectra" [3].

The UE212M elliptical electromagnetic undulator is a modification of the UE212 undulator manufactured by the Institute of Nuclear Physics for PSI (Switzerland) [4].

The changes were made taking into account the experience of manufacturing and operating the UE212 undulator. The main difference between the modernized undulator and its prototype is the addition of 3 horizontal and vertical poles to the structure. The design of the undulator is described in more detail in [5].

In the UE212M undulator, the vertical magnetic field can change from 0T to 0.49T, and the horizontal magnetic field from -0.1T to 0.1T in about 1-5 minutes independently of each other. Therefore, the undulator can operate in various modes.

ELLIPTICAL MODE OF UNDULATOR

On Fig.1 shown the distribution of the magnetic field along the undulator, calculated using the program for magnetostatic calculations “Mermaid”, at the maximal current in the pole coils in the elliptical mode of operation.

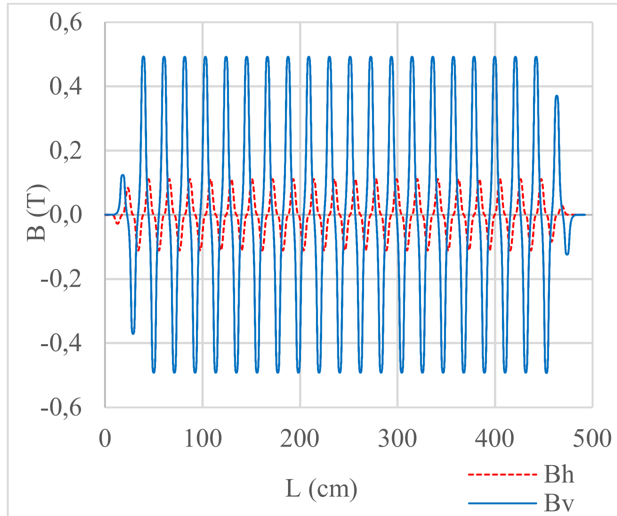


Figure 1: Distribution of vertical and horizontal magnetic field along the UE212M undulator in elliptical undulator mode.

On Fig.2 shown the possible emission spectra from the UE212M undulator in the elliptical mode, modeled using the Spectra program. When the value of the horizontal magnetic field passes through 0, the chirality of elliptically polarized radiation changes, which is very important for studies in the field of circular magnetic dichroism.

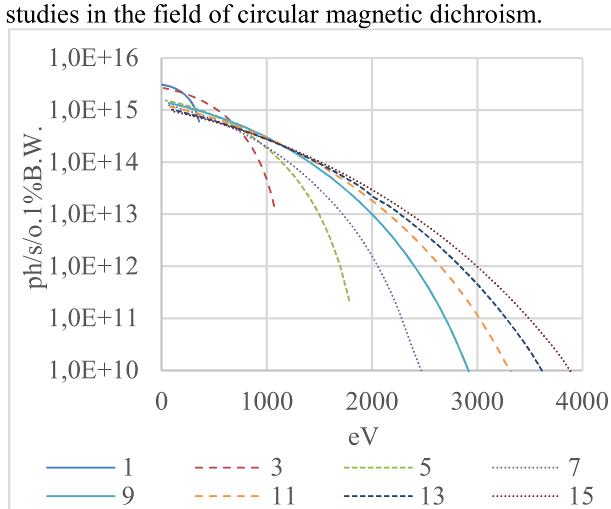


Figure 2: Radiation of the first eight main harmonics of the UE212M undulator in the 6mm×6mm window at a distance of 25m at elliptical mode.

In the case of equal values of the vertical and horizontal fields in the undulator, a circular mode of operation is realized. In this operating mode, the undulator radiates at the basic (fundamental) harmonic, and all higher harmonics are significantly suppressed. Figure 3 shows the possible emission spectra from the UE212M undulator in the circular mode of operation, simulated using the Spectra program.

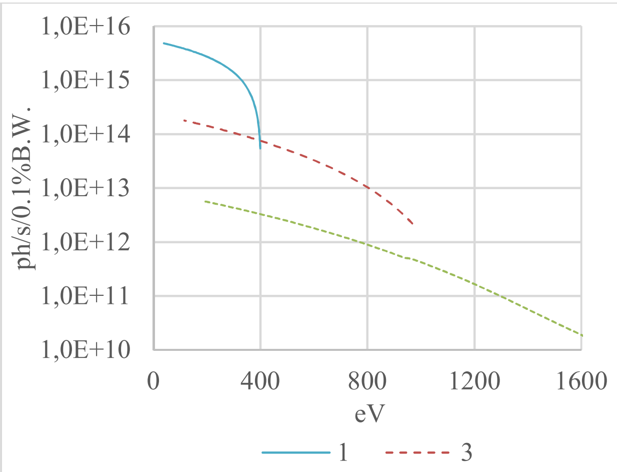


Figure 3: Radiation of three harmonics of the UE212M undulator in the 6mm×6mm window at the 25m distance in the circular mode of operation.

HARMONIC SUPRESSION MODE

In the planar mode, only a vertical, periodic magnetic field with a period of λ =212mm, 20 regular periods, is created in the undulator. The highest value of the magnetic field achievable in this mode of operation $|B_V|$=0.49T.

In some cases, for the normal operation of equipment with SR from the undulator, it is necessary to suppress the 3rd harmonic in the radiation. This can be achieved by reducing the magnitude of the magnetic field in every third regular pole of the undulator by approximately 14%. On Figure 4 shown the distribution of the magnetic field along the undulator, calculated using the Mermaid program for magnetostatic calculations, made for the maximum current in the main pole coils and the additional current reduced by 14% in each third main coil.

On Fig. 5 shows the emission spectra from the UE212M undulator in the planar mode and in the harmonic suppression mode, simulated using the “Spectra” program.

CONCLUSIONS

The proposed design of the elliptical undulator meets most of the user requirements for the implementation of the planned methods of the station "Electronic Structure" in the SKIF project. The radiation generated by the undulator allows scanning in the required spectral range (from 10 to 1600 eV) for the needs of photoelectron spectroscopy. The possibility of choosing the polarization of photons (linear, elliptical or circular) is also a necessary condition for the implementation of polarization-sensitive research, planned at the station.

The technological implementation of the developed design is beyond doubt and is confirmed by the earlier manufactured analogues of this device successfully used at Swiss Light Source (PSI, Switzerland).

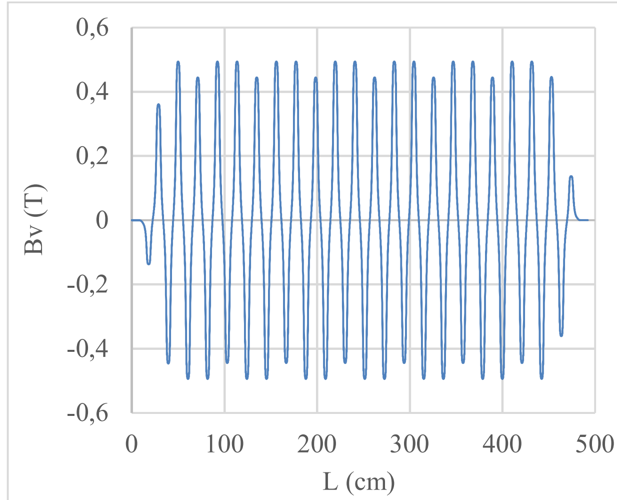


Figure 4: Distribution of magnitude of vertical magnetic field along UE212 undulator in harmonic suppression mode.

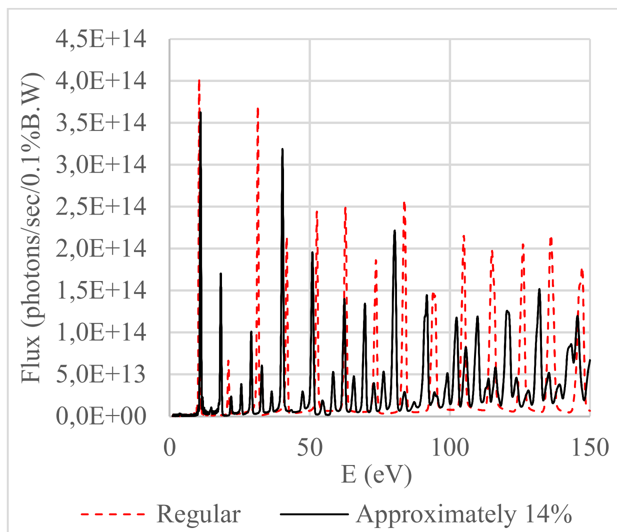


Figure 5: Emission spectra from the UE212M undulator at a distance of 25m from the undulator in a 6mm×6mm window in planar and harmonic suppression modes.

REFERENCES

[1] Baranov G. et al. Lattice optimization of the Novosibirsk fourth-generation light source SKIF. arXiv:2107.03081v1, 7 Jul 2021.

[2] А.Н. Дубровин “Руководство пользователя MERMAID: Магнитный дизайн в двух и трёх измерениях.” Новосибирск, 1994.

[3] J. Synchrotron Radiation 28, 1267 (2021), URL: http://spectrax.org/spectra/index.html

[4] Schmidt T. et al. FIRST RESULTS OF THE UE212 QUSIPERIODIC ELLIPTICAL ELECTROMAGNETIC

UNDULATORS AT SLS. Proceedings of EPAC 2002, Paris, France.
[5] Д.С. Гуров и др. Эллиптический электромагнитный ондулятор UE212M для станции 1-6 «Электронная структура» источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ». Т. 3: Устройства генерации и фронтенды, системы управления и ИТ-обеспечения экспериментальных станций первой очереди; предварительные проекты экспериментальных станций второй очереди. Новосибирск 2022, ISBN 978-5-906376-43-5. URL: https://srf-skif.ru/index.php/

КОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНОГО И ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ФОРМАМИ

Д.А. Шкитов*, М.М. Токтаганова†
Томский политехнический университет, пр-кт Ленина, 30, 634050, Томск, Россия

Abstract

В данной работе представлено описание последних обновлений в разрабатываемом коде для моделирования характеристик переходного и дифракционного излучений от металлических мишеней конечных размеров. Данный код предназначен для расчёта спектральных, угловых и поляризационных характеристик излучения в диапазоне частот от оптического до миллиметрового. Текущая версия кода способна учитывать кривизну поверхности мишени, взаимодействующей с пучком заряженных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Переходное и дифракционное излучение (ПИ и ДИ) находит применение в диагностике характеристик пучков заряженных частиц ускорителей, таких как длина сгустка, поперечные размеры сгустка и эмиттанс [1]. Оно возникает, когда заряженные частицы пересекают или движутся рядом с мишенью. Однако до сих пор нет специальных кодов или модулей программ для моделирования ПИ и ДИ от разных типов мишеней. Большинство исследователей вынуждены разрабатывать свои собственные численные коды или использовать аналитические формулы, которые получены только для небольшого числа случаев и с приближениями. Им приходится также приспосабливать коммерческие пакеты (или открытое ПО) для проведения электромагнитных расчётов, например, CST[1], Zemax[2] или KARAT[3] (см. ссылки и введение в [2]). Добавим, что относительно недавно для расчётов характеристик излучения Вавилова-Черенкова [3, 4] был использован пакет COMSOL Multiphysics. Однако отметим, насколько нам известно, этот пакет для расчётов характеристик ПИ и ДИ ранее не использовался.

В этой работе представлено описание численного кода (скрипта) для расчётов спектральных и угловых свойств ПИ и ДИ от металлических мишеней с конечными размерами. Подход к расчёту в коде основан на обобщенном методе поверхностных токов (см. описание в [2]). В отличие от предыдущей версии кода, разработанной для плоских мишеней, эта версия была модифицирована и добавлена возможность расчётов излучения от мишеней с криволинейными поверхностями.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КОДА

Разрабатываемый код написан на Wolfram Language [5]. Подробное описание математической модели было представлено в прошлой работе [2]. В данной работе мы сосредоточимся на том, что нового было добавлено в код. В дополнение отметим, что достаточно подробное описание модели для расчёта поляризационных характеристик излучения Смита-Парселла от периодических мишеней (решёток) представлено в [6]. Также с применением данного кода было проведено моделирование интерферометрии когерентного переходного и дифракционного излучения в ТГц [7] и ГГц [8] диапазонах частот. К настоящему моменту в коде появилась возможность расчёта когерентного излучения от произвольной последовательности сгустков заряженных частиц, было проведено сравнение результатов моделирования на основе кода с доступными экспериментальными данными по генерации ПИ и ДИ, и была добавлена возможность расчёта характеристик излучения от криволинейной мишени [4].

Учёт когерентности излучения в модели происходит путём умножения [9][5] спектрально-угловой плотности энергии излучения $\frac{d^2W}{d\nu d\Omega}$ на фактор когерентности $B(\nu)$ [10–12]. Для сгустков, распределенных по Гауссу, применяется следующая формула:

$$B(\nu) = N + N(N+1)F(\nu),$$

$$F(\nu) = \left| \sum_{j=1}^{m} \mu_j exp\left[-\frac{2\pi^2\nu^2}{c^2}\left(\sigma_{x_j}^2 s_x^2 + \sigma_{y_j}^2 s_y^2 + \sigma_{z_j}^2 s_z^2\right)\right] \times \right.$$
$$\left. \times exp\left[-i\frac{2\pi\nu}{c}\left(x_j s_x + y_j s_y + z_j s_z\right)\right] \right|^2,$$

где ν – частота излучения, N – количество частиц в пучке, c – скорость света в вакууме, m – количество сгустков в пучке, μ_j – доля от общего заряда в пучке для j-го сгустка (сумма всех μ_j равна единице), $\sigma_{x_j}, \sigma_{y_j}, \sigma_{z_j}$ – поперечные и продольный размеры (среднеквадратичное отклонение) j-го сгустка,

* shkitovda@tpu.ru
† mmt8@tpu.ru

[1] В настоящее время в России официально не доступен.
[2] Ограничен оптическим диапазоном частот.
[3] Разработан в Институте сильноточной электроники СО РАН.
[4] Доступно для Wolfram Language начиная с 10-ой версии.
[5] В работах [9,10] было указано, что в определенных случаях данный подход может быть некорректным.

$\{x_j, y_j\}$ – поперечные смещения j-го сгустка от центральной оси пучка, z_j – расстояние от 1-го до j-го сгустка, $\{s_x, s_y, s_z\}$ – компоненты вектора, зависящие от конкретной геометрии взаимодействия пучка частиц с мишенью (более подробно в [8, 10, 13]).

Форм-фактор $F(\nu)$ учитывает, что пучок заряженных частиц может состоять из последовательности произвольного количества сгустков с одинаковой энергией частиц, но с разными зарядами в сгустках, разными продольным и поперечными размерами в каждом сгустке, разными расстояниями между сгустками и смещениями сгустков от центральной траектории в пучке.

Немаловажным этапом разработки кода является его верификация. Поэтому проводилось сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования, полученных с помощью численного кода. Тем самым подтверждалась работоспособность кода, как инструмента исследования свойств ДИ и ПИ. Сравнение угловых распределений для ультрарелятивистских электронов в оптическим диапазоне излучения в геометрии ПИ и ДИ, как от одной пластины, так и от щелевой мишени [14, 15] (более подробно в [16]), а также зависимости интенсивности излучения от прицельного параметра для умеренно релятивистских электронов в субтерагерцовом диапазоне излучения при переходе от геометрии ДИ к ПИ [15] показало хорошее совпадение результатов.

Возможность расчёта излучения от криволинейных мишеней реализована на основе функционала [17], заложенного в [5], позволяющего проводить интегрирование по произвольному региону (площади или объёму), а не только по заданным пределам. К настоящему моменту проверена возможность такого расчёта только для изогнутых поверхностей, которые можно задать аналитически (см. рис. 1).

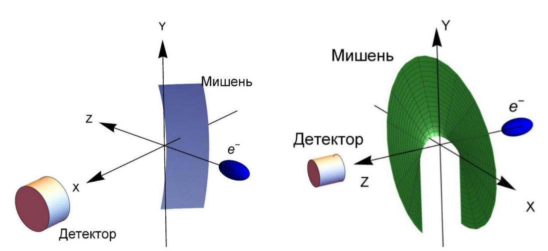


Рис. 1. Примеры криволинейных мишеней: параболическая (слева) и спиральная (справа).

В качестве примера были взяты параболическая мишень [16] – интерес к ней связан с возможностью одновременно генерировать и фокусировать излучение, и спиральная мишень [16, 18] – интерес к такой мишени обусловлен потенциальной возможностью генерировать излучение с ненулевой проекцией углового орбитального момента. Также в модель была добавлена и реализована в коде возможность учёта спектральной чувствительности детектора, например так, как это показано в [7, 8]. Резюмируя, на данный момент ограничения и возможности кода кратко представлены в таблице 1.

Таблица 1. Ограничения модели и возможности текущей версии кода.

Апертура детектора	Точечная
Диэлектрическая проницаемость материалов	∞ (металлы)
Геометрия мишени	Плоские и кривые поверхности
Пучок	Произвольный
Чувствительность детектора	Произвольная
Когерентность излучения	Да
Оптическая система	Нет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проверена и подтверждена применимость обобщённого метода поверхностных токов [2] для расчёта излучения от разных мишеней: плоских, составных, периодических, параболических, спиральных. В код добавлена возможность расчёта характеристик излучения от изогнутых мишеней. Реализован учёт когерентности излучения. Форм-фактор может быть вычислен для пучка с произвольной пространственной структурой и с нормальным распределением частиц в сгустках произвольных размеров и заряда, но с одинаковой энергией частиц.

ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

Помимо не реализованных пунктов, заявленных ранее в [2], учёт линзы в схеме регистрации и апертуры детектора, в будущем планируется учесть некогерентный форм-фактор, описанный в [19], и учесть эффекты негауссовости в распределении заряда в сгустках (см. [20, 21]). Также возможен учёт когерентных эффектов от полых сгустков в пучке [22].

БЛАГОДАРНОСТИ

Основной разработчик кода Шкитов Д.А. выражает благодарность Конькову А.С. за вклад на начальном этапе создания кода и консультации в дальнейшем, и Дышекову А.А. за вклад в разработку кода в части модулей для расчётов криволинейных поверхностей и общую верификацию кода. Авторы выражают благодарность сотрудникам вычислительного кластера Томского политехнического университета на котором выполнялись расчёты. Работа частично поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (программа "Наука"№ FSWW-2023-0003).

REFERENCES

[1] A. Hanuka et al., “Accurate and confident prediction of electron beam longitudinal properties using spectral virtual diagnostics”, Scientific Reports, vol. 11, p. 2945, 2021. doi:10.1038/s41598-021-82473-0

[2] D. A. Shkitov, “Code for simulation of diffraction radiation from flat finite surfaces”, in Proc. 26th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC’18), Protvino, Russia, Oct. 2018, pp. 510–513. doi:10.18429/JACoW-RUPAC2018-THPSC56

[3] S. N. Galyamin et al., “Focusing the Cherenkov radiation using dielectric concentrator: simulations and comparison with theory”, Journal of Instrumentation, vol. 13, p. C02029, 2018. doi:10.1088/1748-0221/13/02/C02029

[4] A. V. Tyukhtin et al., “Development of methods for calculation of bunch radiation in presence of dielectric objects”, in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’19), Melbourne, Australia, May 2019, pp. 2274–2276. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEYYPLS3

[5] https://www.wolfram.com/language

[6] A. P. Potylitsyn, D. A. Shkitov, “Circularly polarized component in the Smith–Purcell radiation”, Journal of Experimental and Theoretical Physics, vol. 133, pp. 649–657, 2021. doi:10.1134/S1063776121120050

[7] D. A. Shkitov et al., “Simulation of the coherent radiation interferometry for the beam temporal structure diagnostics”, in Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC’21), Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 413–416. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC36

[8] D. A. Shkitov et al., “Comparison of the results of simulation and measurements of interference patterns of coherent transition radiation”, Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, vol. 17, pp. 251–257, 2023. doi:10.1134/S102745102301038X

[9] Д. Ю. Сергеева, А. А. Тищенко, “Всегда ли существует форм-фактор в излучении Смита–Парселла?”, Письма в ЖЭТФ, том 115, сс. 762-–768, 2022. doi:10.31857/S1234567822120035

[10] G. A. Naumenko, “Form-factors of relativistic electron bunches in polarization radiation”, Advanced Materials Research, vol. 1084, p. 138, 2015. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1084.138

[11] A. P. Potylitsyn, “Spatial coherence in transition radiation from short electron bunches”, JETP Lett., vol. 103, pp. 669–673, 2016. doi:10.1134/S0021364016110102

[12] D. A. Shkitov, A. E. Harisova, “Form-factor determination of an arbitrary bunch sequence for the coherent radiation calculation”, in Proc. 25th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC’16), St. Petersburg, Russia, Nov. 2016, pp. 322–324. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2016-TUPSA051

[13] М. М. Токтаганова, “Моделирование когерентного излучения последовательностей электронных сгустков фемто- и аттосекундной длительностей”, Бакалаврская работа, Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск, 2020. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/61239

[14] А. А. Дышеков, М. М. Токтаганова, “Верификация и совершенствование численного кода для расчёта характеристик дифракционного излучения”, в Сб. научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, Россия, Апрель 2019, сс. 133–135. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/55814

[15] А. А. Дышеков, “Верификация численного кода для расчёта характеристик дифракционного и переходного излучения”, в Сб. научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, Россия, Апрель 2021, сс. 109–111. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/68354

[16] А. А. Дышеков, “Моделирование дифракционного излучения от металлических мишеней различной формы и конфигурации”, Бакалаврская работа, Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск, 2020. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/61238

[17] Geometric computation, https://reference.wolfram.com/language/guide/GeometricComputation.html

[18] А. А. Дышеков, “Моделирование свойств «закрученного» излучения, генерируемого электронами от спиральной мишени”, в Сб. трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, Россия, Февраль 2020, с. 35–36. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/62224

[19] А. А. Тищенко, Д. Ю. Сергеева, “Некогерентный форм-фактор в дифракционном излучении и излучении Смита–Парселла”, Письма в ЖЭТФ, том 110, сс. 636-–644, 2019. doi:10.1134/S0370274X19220028

[20] М. М. Токтаганова, М. В. Шевелев, “Эффекты негауссовости в распределении заряда в сгустках при генерации когерентного переходного излучения”, в Сб. научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, Россия, Апрель 2021, сс. 340–342. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/68260

[21] М. М. Токтаганова, “Когерентное излучение последовательностей сгустков заряженных частиц на современных ускорителях”, Магистерская работа, Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск, 2023. http://earchive.tpu.ru/handle/11683/76094

[22] Д. Ю. Сергеева, А. А. Тищенко, “Форм-фактор в переходном излучении от полых пучков”, Письма в ЖЭТФ, том 117, сс. 492—497, 2023. doi:10.31857/S1234567823070029

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ЗАМКНУТУЮ ОРБИТУ ПУЧКА НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА СКИФ

Г. Н. Баранов,[1,2,3] П. А. Дергач, [4,5] К. Ю. Карюкина, [1,2,†] Е. Б. Левичев[1,2,3]

[1] Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа им. Г.К.Борескова СО РАН, Кольцово, 630559, Россия,

[2] Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск,630090, Россия,

[3] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073, Россия,

[4] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, 630090, Россия,

[5] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия

[†]e-mail: K.Yu.Karyukina@inp.nsk.su

Абстракт

Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) — источник синхротронного излучения поколения 4+, который строится в Новосибирске. СКИФ характеризуется ультрамалым горизонтальным эмиттансом □ 73 пм·рад, поэтому даже слабый естественный вибрационный фон будет заметно влиять на эффективный размер пучка электронов, а, соответственно, и на яркость СИ. В работе представлены результаты измерений микросейсмических колебаний на площадке строительства ЦКП “СКИФ” и выполнены оценки их влияния на стабильность пучка заряженных частиц.

ВВЕДЕНИЕ

“СКИФ” — источник синхротронного излучения четвертого поколения, который характеризуется ультрамалым эмиттансом заряженных частиц (натуральный эмиттанс 73 пм·рад), высоким током пучка и, соответственно, высокой яркостью излучения, получаемого из вставных устройств. Ток электронного пучка составляет 400 мА, энергия 3 ГэВ, а периметр основного кольца 476 м [1]. Основу структуры составляют TME – образные ячейки [2]. В центре ячейки расположен сильный дипольный магнит (≈ 2.1 Т) для получения более жестких гамма квантов. В бездисперсионных промежутках предусмотрено место для вставных устройств (вигглеров и ондуляторов), инжекции, ВЧ. Магнитная структура основного кольца СКИФ состоит из 16 идентичных ячеек-суперпериодов (7 MBA [3]), схематичное представление одной из них, а также оптические функции представлены на рисунке 1.

В местах расположения вставных устройств пучок электронов имеет горизонтальный и вертикальный размеры $\sigma_x = 33.7$ μm и $\sigma_y = 4.2$ μm. Для достижения пиковой яркости СИ необходимы малые размеры пучка заряженных частиц. В приближении Гаусса пик яркости излучения из ондулятора определяется как [4]:

$$Br \propto \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_u^2}\sqrt{\sigma_{x'}^2+\sigma_{u'}^2}\sqrt{\sigma_y^2+\sigma_u^2}\sqrt{\sigma_{y'}^2+\sigma_{u'}^2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{x,y}$ и $\sigma_{x',y'}$ - электронный размер пучка и расходимость в горизонтальной и вертикальной плоскости в месте излучения, σ_u и $\sigma_{u'}$ - размер и расходимость излучения пучка. Малые размеры пучка накладывают строгие требования на стабильность орбиты, поскольку даже незначительные возмущения орбиты пучка в условиях жесткой оптики СКИФ, могут привести к увеличению эффективного размера пучка и падению яркости СИ.

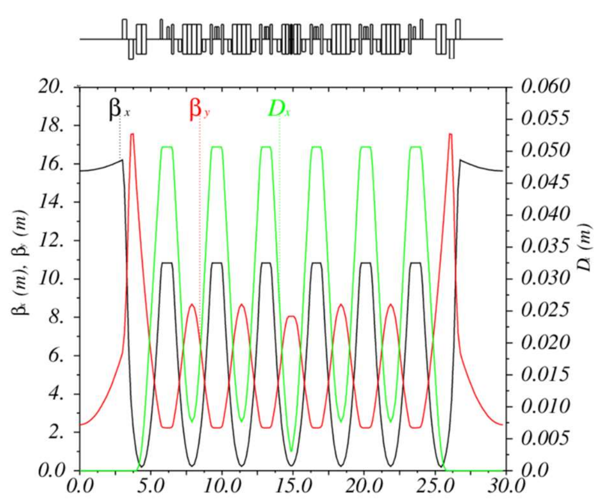


Рис. 1. Оптические функции супер-периода СКИФ (1/16 кольца).

В июле 2021 года были произведены измерения микросейсмических колебаний на площадке ЦКП СКИФ. По результатам этих измерений определены основные источники возмущений, произведена оценка амплитудно-частотных характеристик колебаний. Учитывая полученные экспериментальные данные, проведено моделирование для определения чувствительности структуры СКИФ к смещениям магнитов.

ДОПУСК НА ТОЧНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Для эффективной работы пользователей СИ стабильность орбиты должна быть не хуже 10% от размера пучка [5], соответственно, для вертикальной орбиты среднеквадратичное отклонение не должно быть выше 0.42 μm в местах постановки вставных устройств, расположенных в прямолинейных промежутках. Допуск на точность стабилизации положения пучка электронов также зависит от длины волны излучения, как это видно из формулы 1. Например, на длине волны 1 Å (при длине ондулятора около 2 м.) 10 % смещение орбиты дает 10 % снижение яркости. Кроме того, структура СКИФ позволяет получить более экстремальные режимы с меньшими размерами электронного пучка и связью порядка 1%, которые будут более чувствительны к этому параметру.

ИЗМЕРЕНИЕ МИКРО-СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ПЛОЩАДКЕ ЦКП СКИФ

Анализ влияния вибраций грунта является неотъемлемой частью проектирования современных источников синхротронного излучения [6–8]. Вблизи площадки ЦКП СКИФ есть несколько основных источников техногенных возмущений: автомобильная дорога, завод промышленного производства (ЛВЗ), и, прежде всего, железная дорога (рисунок 2).

Для измерения амплитуды вибраций и их частотного состава производилась непрерывная запись с использованием трехканальных сейсмических регистраторов «SCOUT» [9], укомплектованных низкочастотными геофонами с повышенной чувствительностью «GS-ONE LF» (5 Гц, 100.4 В/м/с) [10]. Для корректного анализа низкочастотной составляющей сигналов (ниже 5 Гц), на этапе обработки производилась процедура частотной коррекции записей к значению 1 Гц [11]. Записи производились одновременно на трех пунктах наблюдения: в непосредственной близости от железнодорожных путей (SKIF-1), рядом с территорией промышленного завода (SKIF-2), а также на площадке строительства накопительного кольца источника СИ СКИФ (SKIF-3).

Рис. 2. Карта района работ. Синие треугольники — пункты вибрационных измерений, красная окружность — место строительства кольца источника СИ СКИФ.

На рисунке 3 представлен пример фрагмента трехкомпонентных записей микросейсм (смещение) для всех пунктов наблюдения, на котором видны сигналы от проходящего поезда, автомобиля и шумы от ЛВЗ. Соответствующие интервалы записи подсвечены желтым, фиолетовым и голубым цветами. Однозначно идентифицированные примеры сигналов обведены черными прямоугольниками. Вертикальная (Z) и горизонтальные (E и N) компоненты записи обозначены красным, зеленым и синим цветами соответственно. Сравнение записей с пунктов наблюдения возле железнодорожных путей (SKIF-1) и в районе площадки строительства (SKIF-3) показало, что по мере приближения к площадке строительства амплитуда сигналов от проходящих поездов снижается приблизительно на порядок. Кроме того, видно, что шумы от автомобильного транспорта на записях с площадки строительства вовсе не видны. Это происходит из-за быстрого затухания сравнительно более высоких частот колебаний, возбуждаемых автотранспортом. Аналогичная ситуация с сейсмическим шумом, источником которого, предположительно, является ЛВЗ.

Анализ всех непрерывных записей показал, что значения RMS (среднеквадратичных) смещений на площадке достигают 52 нм на вертикальной компоненте и 137 нм на горизонтальных. Пиковые значения RMS смещений могут достигать величин порядка 170 нм на вертикальных компонентах записи и 370 нм на горизонтальных.

Для оценки изменения спектрального состава колебаний от проходящего поезда по мере удаления от железнодорожных путей, было произведено сравнение амплитудных спектров синхронных интервалов записей с пунктов SKIF-1 (рисунок 4) и SKIF-3 (рисунок 5). На рисунке 4 наглядно продемонстрировано, что проходящий поезд, генерирует колебания в частотном диапазоне от 2 до 20 Гц. Амплитуда колебаний на вертикальной и горизонтальной компонентах практически идентична в частотном диапазоне выше 4 Гц. В то же время ниже этого значения, спектральный состав колебаний на вертикальной составляющей заметно ниже чем на горизонтальных. Это, по-видимому, связано с механизмом распространения наблюдаемых поверхностных волн в среде.

Из рисунка 5 видно, что высокочастотная составляющая сигнала выше 4 Гц по мере прихода волн на площадку строительства практически затухла, в то время как низкочастотная составляющая еще достаточно уверенно прослеживается. Таким образом, основное влияние на площадку строительства оказывают низкочастотные колебания от проходящих поездов, распространяющиеся преимущественно в горизонтальной плоскости.

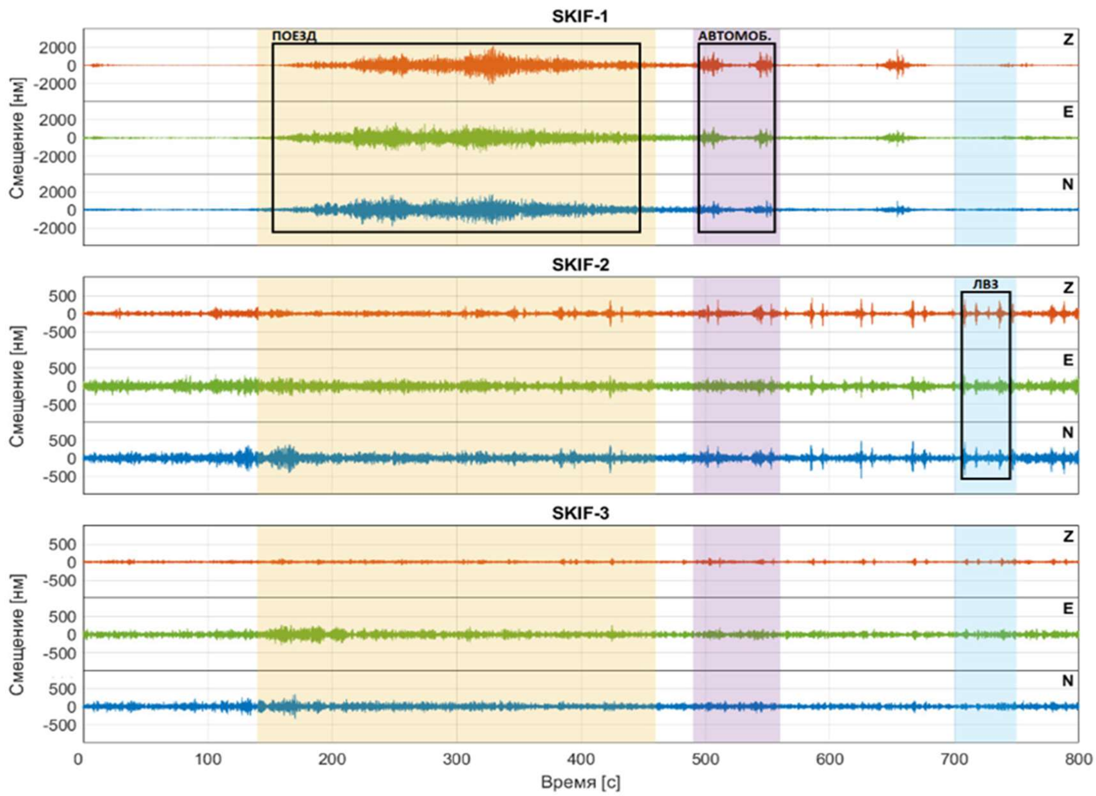


Рис. 3. Пример фрагмента трехкомпонентных записей микросейсм (смещение) для всех пунктов наблюдения, на котором видны сигналы от проходящего поезда, автомобиля и шумы от ЛВЗ. Соответствующие интервалы записи подсвечены желтым, фиолетовым и голубым цветами. Однозначно идентифицированные примеры сигналов обведены черными прямоугольниками. Для записей с пункта SKIF-2 и SKIF-3 масштаб по вертикальной оси уменьшен в 4 раза.

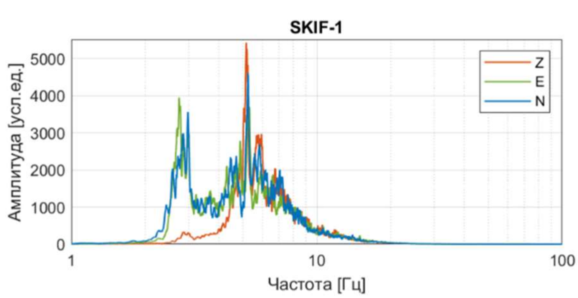


Рис. 4. Амплитудный спектр трехкомпонентного сигнала от проходящего поезда с пункта наблюдения возле ж/д.

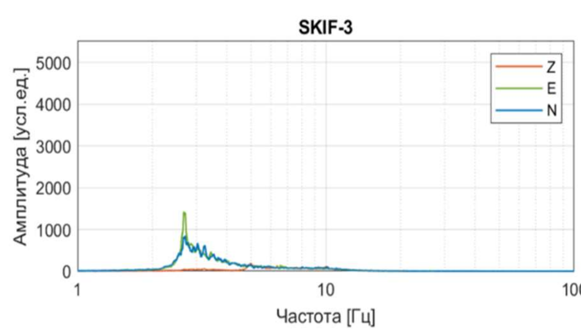


Рис. 5. Амплитудный спектр трехкомпонентного сигнала от проходящего поезда с пункта наблюдения на площадке строительства ЦКП СКИФ.

ОЦЕНКА ИСКАЖЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ ПУЧКА

Для того, чтобы оценить влияние на пучок поперечного смещения отдельных типов магнитных элементов, запишем величину искажения замкнутой орбиты электронов x_{co} как [12]:

$$\langle x_{co} \rangle = M_x \langle \Delta x \rangle, \qquad (2)$$

Δx - поперечное смещение, M_x - статистический коэффициент передачи, а угловые скобки обозначают среднеквадратичное значение. Для разных типов магнитных элементов коэффициент передачи будет разный. Например, для квадрупольных линз, их малые смещения приводят к существенным искажениям замкнутой орбиты, а коэффициент передачи зависит от градиента и бетатронной функции. Были рассчитаны коэффициенты передачи для разных магнитных элементов СКИФ. Была взята среднеквадратичная величина 100 нм, характеризующая прохождение поезда, и, задано случайным образом смещение магнитов на эту величину, распределенную по нормальному закону. Оценка чувствительности структуры проводилось программами численного моделирования Accelerator Toolbox [13] и MADX [14] следующим образом:

- Магнитные элементы, соответствующего типа, смещаются на случайную величину, распределенную по нормальному закону, обрезанному на уровне ±3σ (и по горизонтали и по вертикали). Стандартное отклонение $\sigma_{x,y} = \langle \Delta x, y \rangle$ = 100 нм.
- Отклонение замкнутой орбиты, вызванное смещением магнитных элементов, измеряется в центре каждого прямолинейного промежутка, набирается статистика (более 1000 выборок) - находится среднеквадратичное отклонение орбиты в каждой точке наблюдения $\langle x_{co}, y_{co} \rangle$.
- Коэффициент передачи находится согласно формуле 2. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты передачи для диполей, квадруполей и секступолей при среднеквадратичном смещении магнита 100 нм

	M_{dip}	M_{quad}	M_{sext}	M_{Σ}
x	12	113	4.2×10^{-4}	113
y	28	45	2.2×10^{-4}	53

Из таблицы 1 видно, что для смещений порядка 100 нм, искажение орбиты от секступолей пренебрежимо мало. При этом, влияние секступолей на орбиту пучка будет расти квадратично с увеличением их смещения. Максимальный же эффект вносят, как и ожидалось, сильные квадрупольные линзы. Также, так как большинство дипольных магнитов содержат поперечный градиент поля и участвуют в фокусировке, возбуждают поперечное движение пучка. Согласно таблице 1, суммарный коэффициент передачи при смещении 100 нм - даст усиление в 113 раз по горизонтали и в 53 по вертикали, что уже превышает допуск на точность стабилизации положения пучка электронов. Благодаря проведенным измерениям и оценкам влияния характерных смещений на замкнутую орбиту пучка, становится понятно, что необходима дополнительная система компенсации отклонения замкнутой орбиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ влияния механических вибраций по данным измерений на площадке ЦКП СКИФ. Значения RMS смещений на площадке достигают 52 нм на вертикальной компоненте записи и 137 нм на горизонтальных. Пиковые значения RMS могут достигать величин порядка 170 нм на вертикальных компонентах и 370 нм на горизонтальных. Численное моделирование показало, что данные величины оказывают существенное влияние на отклонение замкнутой орбиты пучка электронов, превышая требования пользователей СИ на стабильность пучка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда и Новосибирской области, грант № 22-27-20146.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev. Physical review accelerator and beams 24 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704

[2] E. Levichev, V. Kvardakov, in Proceedings of RuPAC 2006 (Novosibirsk, Russia, 2006), p. 327

[3] D. Einfeld, J. Schaper, M.Plesko, in Proceedings of: PAC 95 and HEACC 95 (Dallas, USA, 1995) p. 177. DOI: 10.1109/PAC.1995.504602

[4] R. P. Walker, Undulator radiation brightness and coherence near the diffraction limit, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 050704 (2019). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.050704

[5] G. Decker, in Proceedings of DIPAC 2005 (Lyon, France, 2005), p. 233

[6] H. Huang, J. Kay, in Proceedings of EPAC 2006 (Edinburgh, Scotland, 2006), p. 3338

[7] J. A. Balmer, D. J. Holder, H. L. Owen, in Proceedings of EPAC 2000 (Vienna, Austria, 2000), p. 2328

[8] W. Bialowons, H. Ehrlichmann, TESLA report 10 (2005)

[9] SCOUT http://skbsp.ru/index.php/en/land-seismic/scout

[10] GS-ONE LF https://www.geospace.com/products/sensors/gs-one-lf/

[11] P.A. Dergach, T.A. Tubanov, V.I. Yushi, A.A. Duchkov. Seismic Instruments 55(3) (2019), p. 345-352. DOI: 10.3103/S0747923919030046

[12] L Farvacque, Part of Synchrotron radiation and free electron lasers. Proceedings, CERN Accelerator School, CAS, Grenoble, France (1996) p. 287-302

[13] Accelerator toollbox https://github.com/atcollab/at

[14] MAD-X https://mad.web.cern.ch/mad/

ПРОЕКТ ИСТОЧНИКА КОМПТОНОВСКИХ ФОТОНОВ НА СКИФ

В. В. Каминский*, О. И. Мешков,
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация

Рассматривается возможность создания источника комптоновских фотонов на строящемся электронном накопителе-источнике синхротронного излучения СКИФ. На таком источнике можно получать фотоны с энергиями от единиц МэВ до 530 МэВ с частотой до 400 МГц. Сверхмалый эмиттанс накопителя СКИФ позволяет эффективно коллимировать поток фотонов и/или использовать систему мечения для монохроматизации фотонов с разрешением порядка 0,6 %. С таким источником фотонов можно проводить исследования в области фотоядерной физики от ядерной спектроскопии до фоторасщепления ядер в широком диапазоне энергий.

КОНЦЕПЦИЯ

Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) — строящийся в г. Кольцово Новосибирской области специализированный источник синхротронного излучения поколения «4+» [1]. Основные параметры накопителя приведены в таблице 1. Такие параметры как рекордно малый эмиттанс, (фиксированная) средняя энергия пучка 3 ГэВ, достаточно высокий средний ток электронов позволяют создать на его базе эффективный источник комптоновских гамма-квантов с энергиями от единиц до полутысячи МэВ.

Таблица 1: Основные параметры накопителя СКИФ

Энергия пучка	3.0 ГэВ
Частота обращения	629.63 кГц
Средний ток электронов	400 мА
Число сгустков	567
Время между сгустками	2.8 нс (84 см)
Горизонтальный эмиттанс	75 пм·рад

Устройство комптоновского источника на накопителе СКИФ изображено на рисунке 1. Оно довольно стандартное, так, например, были устроены эксперименты на коллайдере ВЭПП-4М [2]. Излучение лазеров через фокусирующую и поляризационную оптику вводится в вакуумную камеру накопителя зеркалом навстречу электронному пучку. Комптоновские фотоны из области взаимодействия проходят через то же самое зеркало, через систему коллиматоров и вето-счётчик или магнит, отсекающий заряженные частицы. Далее на пути комптоновских фотонов расположены мишени и детекторы для экспериментов на пучке гамма-квантах, а после них — вето-счётчик и калориметр. В следующих после области взаимодействия магнитных элементах расположена система мечения — координатный детектор для электронов, потерявших энергию при комптоновском рассеянии (электроны отдачи) и отклонившихся от равновесного пучка электронов к центру накопителя. Так можно измерять их энергию и рассчитывать (метить) энергию соответствующих им комптоновских фотонов. Напротив окна ввода лазерного излучения через область взаимодействия располагается выводное окно, которое можно использовать для диагностики и настройки вводимого лазерного излучения и/или организации накопительного резонатора для увеличения мощности лазерного излучения.

Частота следования сгустков электронов в накопителе СКИФ достаточно большая, 357 МГц. С одной стороны, довольно сложно изготовить достаточно мощный импульсный лазер, работающий на этой частоте с длительностью импульса меньше наносекунды и субнаносекундной нестабильностью запуска. С другой стороны, при применении непрерывного лазерного излучения получается меньшая множественность комптоновских событий, что желательно при применении системы мечения комптоновских фотонов по энергии электронов отдачи. Но маловероятно, что сама система мечения будет работать на частоте выше 150 МГц (период около 6 нс, характерное время срабатывания быстрого компаратора), а импульсный лазер на таких частотах представляется вполне возможным. Тем не менее, целесообразным представляется использование хорошо освоенных технологий мощных (>2 Вт) непрерывных лазеров на Nd:YLF (или Nd:YAG) на 1, 2, 4 гармониках и CO_2, это несколько проще. С этими лазерами при энергии накопителя СКИФ 3 ГэВ можно получать (при лобовой встрече) следующие максимальные энергии: 16 МэВ, 153 МэВ, 291 МэВ, 530 МэВ.

ОГРАНИЧЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ

Основное назначение накопителя СКИФ — источник синхротронного излучения. Вследствие этого энергия пучка электронов постоянная, 3 ГэВ, инжекция почти непрерывная по схеме «top-up», а магнитная структура оптимизирована для получения сверхмалого эмиттанса. Поэтому при разработке комптоновского источника нельзя менять магнитную структуру, для области встречи есть только поворотные магниты и прямолинейные промежутки для инжекции и ускоряющих резонаторов.

Энергетический аксептанс СКИФ составляет 2.6%, поэтому после комптоновского рассеяния в равновесном пучке остаются электроны отдачи с энергией $E > E_0 - 78$ МэВ. Эти электроны в некоторой степени портят эмиттанс (предстоит исследовать), и поток комптонов-

* V.V.Kaminskiy@inp.nsk.su

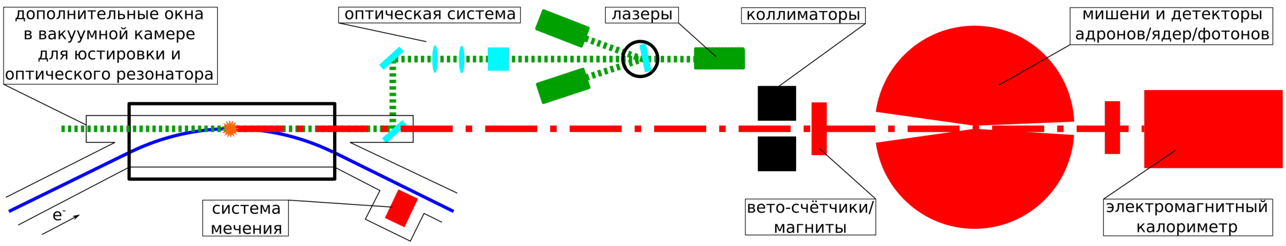


Рис. 1: Схема комптоновского источника на синхротроне СКИФ. Оптические пути и размеры не в масштабе.

ских квантов от углекислотных лазеров должен быть ограничен. Часть электронов отдачи от более коротковолновых лазеров выбывает из пучка, и поэтому, чтобы существенно не понижать время жизни пучка (примерно 1 час), поток комптоновских фотонов не должен быть больше 200–400 МГц (соответствует лазеру мощностью до 13 Вт).

Из-за фиксированной энергии накопителя монохроматизация гамма-квантов представляет собой вызов. Для коротковолновых лазеров (с фиксированной длиной волны) можно использовать систему мечения. С другой стороны, можно применять коллимирование комптоновских фотонов (на энергии ω_{max}) и перестраиваемые лазеры, в том числе, длинноволновые. Они, как правило, менее мощные, чем с фиксированной длиной волны, и тогда нужно повышать мощность излучения с помощью оптического накопительного резонатора.

Накопитель СКИФ имеет сверхмалый эмиттанс, и в результате малы координатный и угловой разбросы пучка электронов и следовательно, комптоновских фотонов. Поэтому коллимация гамма-квантов будет выделять узкую полосу по энергии при большой интенсивности потока, система мечения будет иметь хорошее энергетическое разрешение, а коллимированные фотоны на максимальной энергии будут иметь высокую среднюю степень поляризации. Кроме того, представляются возможными эксперименты по получению закрученных комптоновских фотонов, это в настоящий момент ещё нигде не реализовано.

МЕСТО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПОТОКИ ГАММА-КВАНТОВ

Предварительно место фотон-электронного взаимодействия запланировано в мягком диполе BDA1 в одном из суперпериодов магнитной структуры. Достоинством такого решения является возможность использовать инфраструктуру, почти повторяющую стандартные каналы вывода синхротронного излучения, а также относительно небольшая длина оптической системы.

В магнитном поле обратное комптоновское рассеяние имеет особую форму сечения, вызванную интерференцией гамма-квантов, излучаемых с искривлённой траектории электронов, такое явление впервые наблюдали на коллайдере ВЭПП-2000 [3]. На СКИФ эффект от магнитного поля также будет наблюдаться, но наиболее он выражен для CO_2 лазера ($\omega_0 = 0.117$ эВ), как показано на рисунке 2 для поля магнита BDA1 0.556 Тл: дополнительные максимумы составляют почти половину амплитуды основного, высокоэнергетического максимума (крайняя правая полоса на рисунке слева). Для высоких энергий начальных фотонов (например, гармоник Nd:YAG) эффект менее выражен: дополнительные максимумы составляют не более процента от основного максимума.

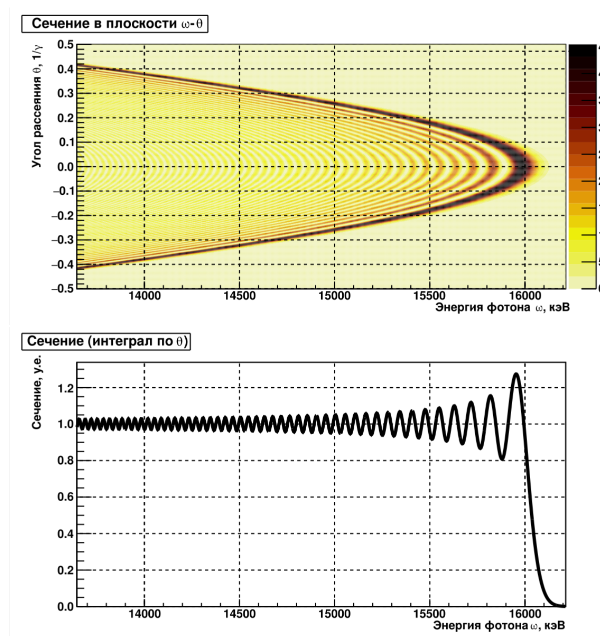


Рис. 2: Сечение обратного комптоновского рассеяния в магнитном поле ($E_0 = 3$ ГэВ, $\omega_0 = 0.117$ эВ, $B = 0.556$ Тл). Сверху: дифференциальное сечение по углу и энергии, снизу: сечение по энергии.

Число актов комптоновского рассеяния в единицу времени рассчитывалось по формуле, аналогичной светимости коллайдера из первых принципов:

$$\dot{N} = \sigma_C \mathscr{L} = \sigma_C \iiint_{-\infty}^{+\infty} 2\rho_e(x,z,s)\,\rho_\gamma(x,z,s)\,dx\,dz\,ds =$$

$$= \sigma_C \frac{N_e N_b f_e n_\gamma}{\pi} \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \frac{\exp\left[-\frac{x_0^2}{2(\sigma_x^2+\sigma_l^2)} - \frac{z_0^2}{2(\sigma_z^2+\sigma_l^2)}\right]}{\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_l^2}\sqrt{\sigma_z^2+\sigma_l^2}}\,ds\,, \quad (1)$$

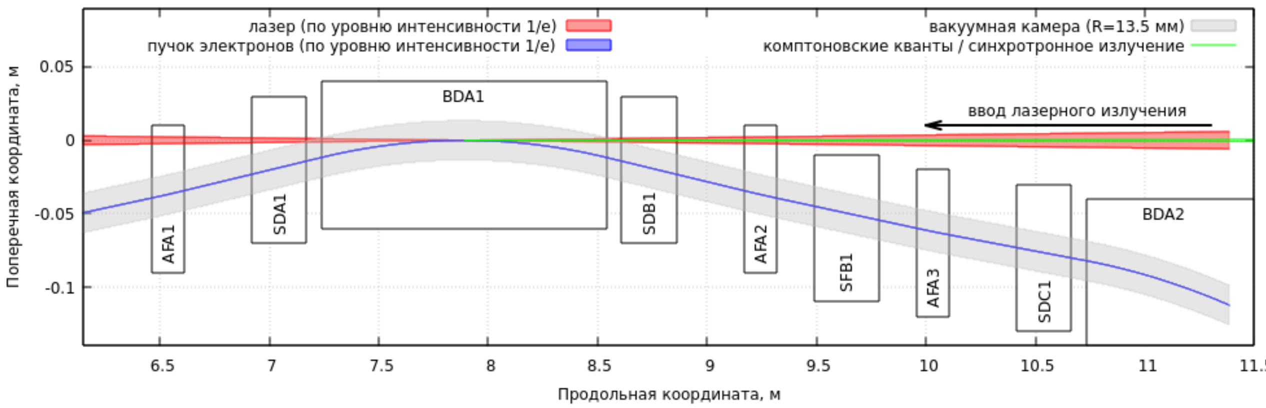


Рис. 3: Схема области фотон-электронного взаимодействия

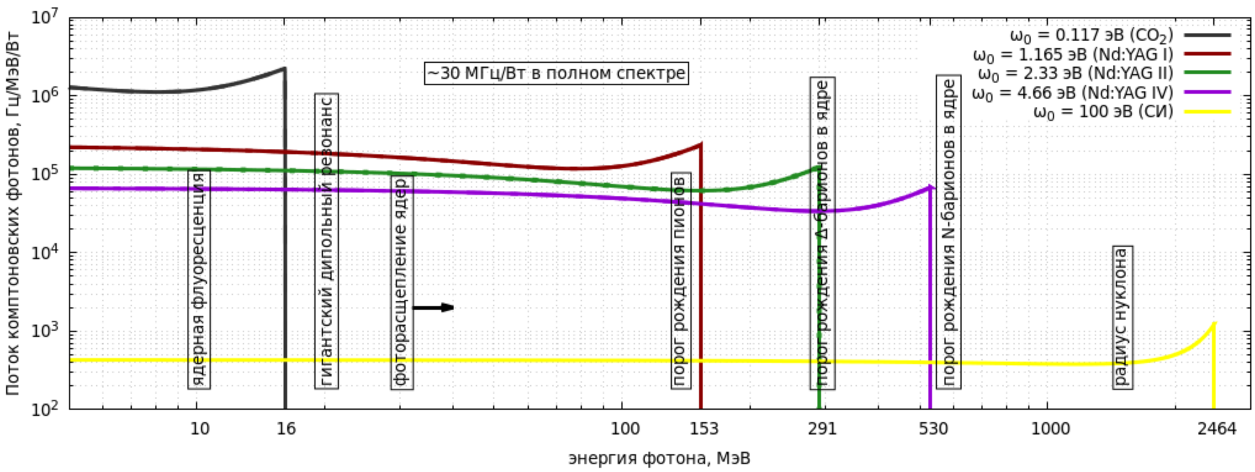


Рис. 4: Спектры комптоновских фотонов при E_0 = 3 ГэВ, P = 1 Вт и разных начальных энергиях фотонов

где σ_C — сечение комптоновского рассеяния (для указанных лазеров 550 … 660 мбарн); N_e, N_b, f_e — число электронов в сгустке, число сгустков и частота обращения; $n_\gamma = \partial N_\gamma / \partial s = P\lambda/(hc^2)$ — линейная плотность лазерных фотонов; $\sigma_x(s)$, $\sigma_z(s)$ — поперечные размеры электронного пучка; $\sigma_l(s) = \sigma_0\sqrt{1 + s^2/Z_R^2}$ — поперечный размер лазерного пучка (σ_0 — размер перетяжки, $Z_R = 4\sigma_0^2/\lambda$ — рэлеевская длина); $x_0(s)$, $z_0(s)$ определяют орбиту пучка электронов отличную от прямой, соосной лазерному пучку (включая поворот в поперечном магнитном поле); 2 под интегралом — мёллеровский фактор; интегрирование ведется по промежутку встречи внутри поворотного магнита.

Нетрудно понять, что светимость, кроме тока электронов и мощности лазера определяется размером лазерной перетяжки, а он, в свою очередь, зависит от доступной апертуры оптической системы. Для магнита BDA1 оптимум достигается при размере перетяжки около 25 мкм (λ = 1024 нм), это вполне реалистичное значение. Данная конфигурация показана на рисунке 3. Поток фотонов при рабочем токе и расчётной магнитной структуре составляет примерно 30 МГц на каждый ватт лазерной мощности. Спектры комптоновских фотонов при мощности лазера 1 Вт показаны на рисунке 4.

СИСТЕМА МЕЧЕНИЯ И КОЛЛИМИРОВАНИЕ ФОТОНОВ

Система мечения — участок накопителя с дипольными магнитами и координатные детекторы вне равновесного пучка, выполняющий роль магнитного спектрометра для электронов отдачи. Детекторы системы мечения располагается в том месте, где отклонение рассеянных электронов от равновесной орбиты максимально. Результаты моделирования динамики электронов после комптоновского рассеяния в магните BDA1 показаны на рисунке 5. Таким образом, есть два подходящих максимума отклонения рассеянных электронов в пределах того же суперпериода магнитной структуры (в следующих суперпериодах отклонение больше размера вакуумной камеры), в которых разумно расположить два детектора системы мечения. В первом детекторе в пределах вакуумной камеры (диаметр 27 мм) регистрируются низкоэнергетические электроны (соответствуют фотонам с энергий до 600 МэВ) от рассеяния 263 нм ла-

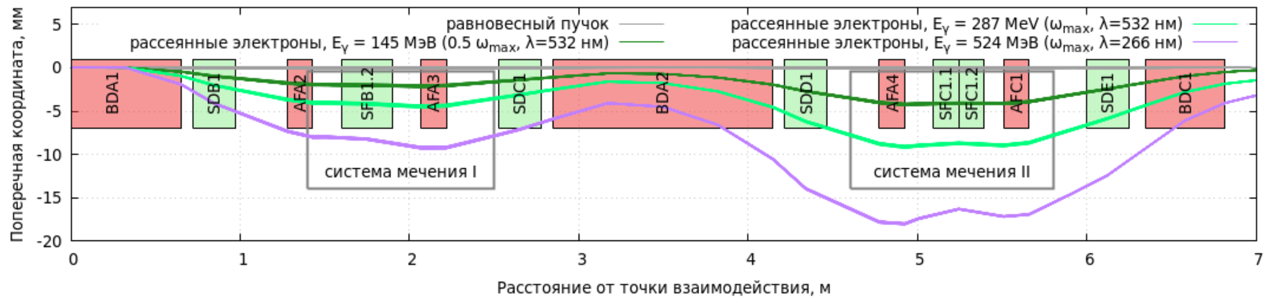


Рис. 5: Динамика рассеянных электронов и система мечения

зера, во втором – более энергичные (потерявшие меньше энергии, фотоны до 400 МэВ).

Ширина пучка электронов одной энергии в указанных позициях составляет 60–70 мкм, этой величиной определяется разрешение системы мечения. Разрешение системы мечения по энергии фотонов тогда составляет 0.6 … 0.8% или около 2 МэВ по энергии фотона. Для того, чтобы с оптимальным разрешением регистрировать такие электроны, нужен координатный детектор с шагом 50 мкм, например, полупроводниковый микрополосковый (Si/GaAs). Заметим также, что при энергии фотона порядка нескольких десятков МэВ рассеянные электроны летят слишком близко к равновесному пучку, сливаются с его гало. Всего в активную область помещается 280 каналов, такой детектор представляется возможным (см. эскиз на рисунке 6).

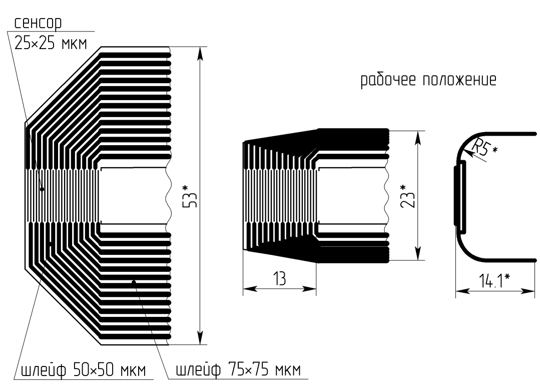


Рис. 6: Эскиз детектора для системы мечения с гибкими шлейфами

Сверхмалый эмиттанс накопителя СКИФ позволяет эффективно использовать монохроматизацию гамма-квантов путём их коллимировании. Грубая оценка даёт минимальную ширину полосы энергии порядка 6 МэВ (ω_0 = 1.165 эВ), в дальнейшем это нужно моделировать.

ВОЗМОЖНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В области энергий гамма-квантов от единиц до десятков МэВ есть задачи, связанные с исследованием структуры ядер. Это, прежде всего, фотоядерные реакции в области гигантского дипольного резонанса и ниже: тонкая структура ГДП, абсолютные сечения, пигми-резонансы и т. д. Здесь же находятся некоторые смежные вопросы, например, астрофизическая проблема возникновения «обойдённых» ядер (нейтронодефицитных ядер, которые не могут быть получены в результате последовательного захвата нейтронов ядрами в недрах звёзд). Такие фотоядерные реакции исследованы подробно еще на тормозном излучении, а в настоящее время продолжают работать такие мощные установки как HiγS (Дюковский университет, США) [4] с энергиями до 160 МэВ и интенсивностями до сотен мегагерц.

Гамма-кванты с энергиями до 16 МэВ можно получать с помощью углекислотного лазера, а до 30 МэВ — и с CO-лазером. На СКИФ работа в «низкой» области энергий затруднена, так как полноценная монохроматизация невозможна: система мечения не работает, и коллимирование потока при фиксированной энергии накопителя не выделяет произвольную энергию.

В «среднем» диапазоне энергий — сотни МэВ — можно исследовать такие процессы как фотоделение ядер, дельбрюковское рассеяние и расщепление фотона в поле тяжёлых ядер, фоторождение пионов, гиперядер и Δ- и N-барионов (N-барионы только на пороге), а также проводить калибровку различных детекторов, применяемых в физике высоких энергий. Конкуренты в этой области — такие установки как GRAAL (накопитель ESRF, Франция) [5] с энергиями гамма-квантов 110–450 МэВ и интенсивностями порядка мегагерц. Здесь лазеры на Nd:YAG или Nd:YLF позволяют получить гамма-кванты с энергиями до 530 МэВ, и полноценно работает система мечения. Множественность комптоновских фотонов на один электронный сгусток меньше 1, монохроматизация и малый угловой размер пучка позволят здесь добиться успехов.

Кроме этого, планируются методические эксперименты. Например, создание оптического резонатора-накопителя, встроенного в промежуток взаимодействия, позволяющего поднять мощность лазерного излучения в месте взаимодействия. При освоении этой технологии можно использовать и перестраиваемые лазеры, и тогда возможности монохроматизации гамма-квантов существенно расширяются.

При взаимодействии в поворотном магните представляется интересным использование синхротронного излучения пучка как источника начальных фотонов. Если по пути СИ расположить фокусирующее зеркало на расстоянии, кратном половине расстояния между сгустками, 42 см, то СИ из предыдущего сгустка взаимодействует с одним из последующих. В настоящее время в России существуют технологии изготовления таких зеркал, например, 100 эВ$\pm$2% с коэффициентом отражения 0.7 [6]. С таким зеркалом получатся комптоновские кванты с энергией до 2464 МэВ с потоком порядка 600 кГц.

В качестве первого, демонстрационного эксперимента предлагается провести измерение абсолютных сечений фотоделения актинидов, где до сих пор есть расхождения нескольких экспериментов как между собой, так и с теорией. Так, в первых экспериментах по фотоделению ядер ^{238}U и ^{237}Np на коллайдере ВЭПП-4 [7] было замечено (как и в более ранних исследованиях), что полное сечение фотоделения ^{237}Np в области нуклонных резонансов (при энергии фотона >150 МэВ) на 60% превышает «универсальное» сечение фотопоглощения, рассчитанное как сумма сечений рождения π-мезона на всех нуклонах ядра, в то время как считалось, что аналогичное сечение для ^{238}U совпадает с «универсальным» сечением. В последующих экспериментах [8, 9] эти результаты были подтверждены и расширены, и концепция «универсальности» была пересмотрена: полное сечение фотоделения только на 80% объясняется «универсальным» процессом. Исходя из выше сказанного, предлагаемый источник комптоновских фотонов может успешно решить эту задачу за счет улучшения ситуации с наложением событий (множественности фотонов за сгусток), большей интенсивности потока, существенно лучшей монохроматизацией и новым детектором. Дальнейшая экспериментальная программа разрабатывается.

Кроме указанных экспериментов ИЯФ СО РАН имеет достаточно большой опыт создания и эксплуатации комптоновских источников: определение сечений фотоделения ядер Bi, Pb, Au, Pt, W, Ta, V, Ti, Al [10, 11], расщепление фотона в полях ядер [12] и дельбрюковское рассеяние [13], а также тестирование и калибровка различных электромагнитных детекторов [14, 15]. В настоящее время работают комптоновские установки для диагностики пучков в коллайдерах ИЯФ [3,16]. С другой стороны, эксперименты по фотоядерной физике были проведены давно, и соответствующие компетенции в ИЯФ практически потеряны. В связи с этим для эксплуатации комптоновского источника на СКИФ необходимо создать новую команду специалистов по фотоядерной физике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен эскизный проект источника комптоновских фотонов в диапазоне энергий $\omega_{\max} = 16\dots530$ МэВ на накопителе СКИФ для экспериментов в области фотоядерных реакций, нелинейной квантовой электродинамики, калибровки электромагнитных детекторов и других применений. В качестве источников начальных фотонов предполагается использовать излучение мощных непрерывных лазеров излучения видимого, УФ и ИК диапазона, с которыми интенсивность потока рассеянных фотонов составит $10^7 \dots 10^8$ Гц (в полном спектре). Уникальные параметры СКИФ позволят получить малый угловой разброс комптоновских фотонов, малую множественность событий и монохроматизацию спектра комптоновских фотонов с помощью системы мечения. В качестве первой серии экспериментов предлагается исследование полного сечения фотоделения ядер актинидов в диапазоне энергий гамма-квантов сотен МэВ, для которого с 1980-х годов известно о расхождении экспериментальных и теоретических значений. Предстоит более подробно проработать отдельные узлы установки, оптимизировать ее параметры, спроектировать детектор для первых экспериментов и определить дальнейшую физическую программу. Необходимы специалисты как для проведения экспериментов по фотоядерной физике, так и по детекторам для фотоядерной физики.

REFERENCES

[1] *Баранов Г.Н., и др.* Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске // Сибирский физический журнал. 2020 Т. 15, № 1. `http://doi.org/10.25205/2541-9447-2020-15-1-5-23`

[2] *Kezerashvili G.Ya. et al.* A Compton source of high energy polarized tagged γ-ray beams. The ROKK-1M facility // Nucl. Instr. & Meth. B. 1998. V. 145. № 1–2. P. 40. `http://dx.doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00266-3`

[3] *Abakumova E.V, et al.* Backscattering of Laser Radiation on Ultrarelativistic Electrons in a Transverse Magnetic Field: Evidence of MeV-Scale Photon Interference // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 140402. `http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.140402`

[4] *Weller H.R., et al.* Research opportunities at the upgraded HIγS facility, // Progress in Part. and Nucl. Phys. 2009. V. 62. № 1. P. 257. `http://doi.org/10.1016/j.ppnp.2008.07.001`

[5] *Bocquet J.P., et. al.* GRAAL: a polarized γ-ray beam at ESRF // Nucl. Phys. A. 1997. V. 622. № 1–2. P. c124. `http://doi.org/10.1016/S0375-9474(97)00337-0`

[6] *Vainer Y.A., et al.* Beryllium-Based Multilayer Mirrors for the Soft X-Ray and Extreme Ultraviolet Wavelength Ranges. // J. Surface Investig. 2020. V. 14. P. 124. http://doi.org/10.1134/S1027451020020160

[7] *Kazakov A. A. et al.* Fission of ^{238}U and ^{237}Np by intermediate-energy γ rays // JETP Lett. 1984. V. 40. № 10. P. 1271.

[8] *J. C. Sanabria et al.* Photofission of actinide nuclei in the quasideuteron and lower part of the Δ energy region // Phys. Rev. C. 2000. V. 61. P. 034604.

[9] *C. Cetina et al.* Photofission of heavy nuclei from 0.2 to 3.8 GeV // Phys. Rev. C. 2002. V. 65. P. 044622. `http://doi.org/10.1103/PhysRevC.65.044622`

[10] *Terranova M.L. et al.* Fissility of Bi, Pb, Au, Pt, W, Ta, V, and Ti nuclei measured with 100–MeV Compton back scattered photons // J. Phys. G. 1996. V. 22. P. 511. http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/22/4/012

[11] *Tavares O.A.P. et al.* Photofission of Al-27 nucleus in the quasi-deuteron region of photonuclear absorption // J. Phys. G. V. 25. № 9. P. 1979. http://dx.doi.org/10.1088/0954-3899/25/9/315

[12] *Akhmadaliev Sh.Zh. et al.* Experimental investigation of high-energy photon splitting in atomic fields // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 061802. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.061802

[13] *Akhmadaliev Sh.Zh. et al.* Delbrück scattering at energies of 140-450 MeV // Phys. Rev. C. 1998. V. 58. P. 2844. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.58.2844

[14] *Aulchenko V.M. et al.* The test of the LKr calorimeter prototype at the tagged photon beam // Nucl. Inst. & Meth. A. 1997. V. 394. № 1–2. P 35. http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00518-4

[15] *Ikeda H. et al.* A detailed test of the CsI(Tl) calorimeter for BELLE with photon beams of energy between 20 MeV and 5.4 GeV // Nucl. Inst. & Meth. A. 2000. V. 441, № 3. P. 401. http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00992-4

[16] *Blinov, V.E. et al.* Status of laser polarimeter at VEPP-4M // Journal of Instrumentation. 2020. V. 15, № 08. http://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/C08024

PRODUCTION OF A BEAM OF HIGH-ENERGY PARTICLES WITH A SMALL ANGULAR DIVERGENCE USING A SYSTEM OF TWO FOCUSING CRYSTAL DEVICES*

A. G. Vasilyeva†, M. Yu. Chesnokov, Yu. A. Chesnokov, M. Yu. Kostin, V. I. Pitalev, I. V. Poluektov, Yu. E. Sandomirsky, A. A. Yanovich,
NRC "Kurchatov Institute" - IHEP, Protvino, Russia

Abstract

In the TeV range of energies, it becomes difficult and very costly to control particle trajectories using electromagnets to obtain extracted beams at accelerators. For these purposes, high-gradient devices based on curved crystals are more suitable. These crystals can work as ultra-strong lenses with a focal length of less than 1 m, with an equivalent magnetic field of 1000 Tesla. In this work, we implemented a scheme for the formation of a divergent beam with an energy of 50 GeV by two focusing crystals placed in series to create an axially symmetric beam with a small divergence of 30 μrad in both the horizontal and vertical planes. One of the promising applications of such a scheme is the creation of high-energy neutrino and muon beams.

INTRODUCTION

In the TeV energy range, it becomes difficult and very costly to control particle trajectories using electromagnets to obtain extracted beams. High-gradient devices based on bent crystals are more suitable for these purposes [1]. In this work, we implemented a scheme for the formation of a divergent beam with an energy of 50 GeV by two successively arranged focusing crystals to create an axially symmetric beam with a small divergence $\theta_c = 30$ μrad in both the horizontal and vertical planes. ($\theta_c = (2U_c/pv)^{1/2}$ is the critical channeling angle, or Lindhard angle, where $U_c \sim 20$ eV is the value of the potential barrier of the planar channel (111) in silicon, p, v are the momentum and velocity of the incident particle, see [1]). One of the promising applications of such a scheme is the creation of high-energy neutrino and muon beams.

Curved crystals are used in accelerators to extract or collimate proton beams [2-8]. It was shown in [9-13] that high-energy particle beams can be simultaneously deflected and focused using a bent crystal with a focusing end face. Several experiments have shown that the efficiency of particle beam deflection by a focusing crystal can reach tens of percent [14, 15]. Recently, CERN [16] showed that two crystals with rectangular end faces arranged in series can be used for efficient control of a proton beam at an accelerator. Crystals with a focusing edge can form beams of secondary particles emitted from targets with a significant angular divergence.

* Work supported by Russian Science Foundation (grant 23-22-00001).
† email address *vasilyeva-ag@ihep.ru*.

EXPERIMENTAL SETUP

To implement the scheme for the formation of a divergent beam by two successive focusing crystals, 2 copies of crystalline devices with a focal length of 1.7 m and 2 m were fabricated on the U-70 based on trapezoid-shaped plates with a beveled end face (Fig. 1).

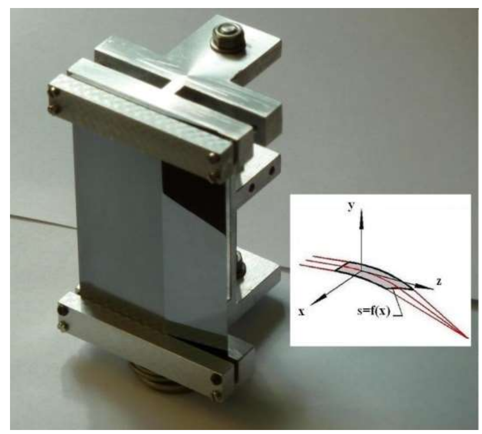


Figure 1: Photo of a focusing crystal device and a scheme for focusing a beam from a parallel to a point using such a single crystal.

In this original design, a trapezoidal crystal plate cut from silicon along the (111) crystallographic plane has dimensions: 2 mm in width X, 70 mm in height Y, and a length along the beam along the Z coordinate from 20 to 40 mm, thanks to the beveled end face. The metal crystal holder creates a longitudinal bending moment along the Y coordinate. Due to the anisotropic properties of the crystal lattice (see, for example, [1] p. 85), a transverse bending of the crystal with a radius of several meters occurs, which is used for focusing and subsequent deflection of particles. Design features (large crystal height), as can be seen from Fig. 1 make it possible to reduce the background conditions, since the material of the metal holder does not enter the beam, only the crystal itself, which has a length of only 6% of the length of the nuclear interaction, is irradiated. Compared to the previous examples of crystalline lenses, these are also characterized by more precise surface treatment methods.

First, these crystals were tested on the KRISTAL facility located on the U-70 extracted beam in the mode of focusing from a parallel beam to a point, where the focal lengths were measured and the quality of focusing was checked. The channeling mode was determined using scintillation telescopes, and the beam envelope as a result of focusing was determined using emulsion film layers, as was done earlier in [11].

Note that in the CERN experiments [17-19] it was found that in the channeling regime at high energies, the multiple scattering of particles decreases by a factor of 8. Such weak Coulomb scattering in the channeling mode means that vertically and horizontally focusing crystals arranged in series will not interfere with each other. This makes it possible to create beam formation systems from several successively arranged crystals, for example, to create axially symmetric pion and kaon beams for generating neutrinos according to a new scheme.

On beam line 4a of the U-70, an experiment was carried out to test a crystal-optical system composed of these crystals, namely, a two-crystal scheme, which makes it possible to obtain an axially symmetric beam with a small angular divergence for generating neutrinos (Fig. 2).

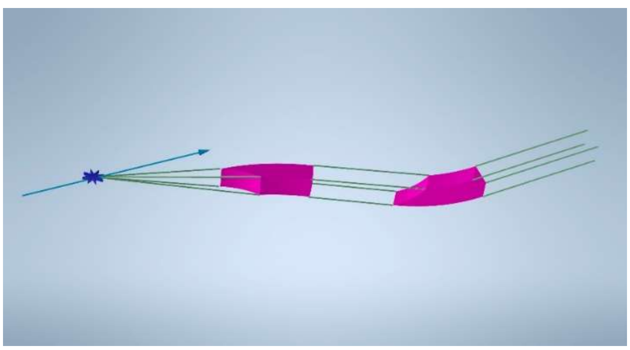


Figure 2: Two-crystal optical scheme for the formation of an axially symmetric beam.

The existing KRISTAL installation for these tests was supplemented with a second goniometer for a vertically deflecting crystal (Fig. 3).

To create a point source of a diverging proton beam with an energy of 50 GeV, an active target T was installed in the form of a thin plate (150 μm thick) from a heavy CsI scintillator. Only a small fraction of the beam with an intensity of 2×10^3 particles/s hit the target. The proton beam in the target was fluffed up to the required angular divergence $\sigma_x = \sigma_y = 0.9$ mrad. The crystals were introduced into the channeling mode one by one, according to the scheme shown in Fig. 4, as was done in [14].

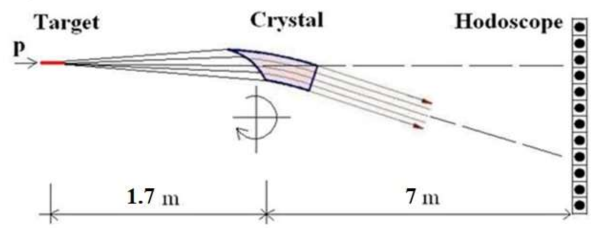


Figure 4: Scheme of finding the channeling mode in the crystal located in the goniometer.

RESULTS

The effect of focusing and subsequent deflection of the diverging beam was recorded with a scintillation hodoscope (with a step of 1.6 mm) switched on for coincidence with a thin target scintillator, according to the method applied in [14].

According to a similar scheme, a vertically deflecting crystal was tuned to the channeling mode. After that, the crystals were introduced into the beam simultaneously. Fig. 5 shows the first results on the efficiency of deflection of a beam diverging from a target after passing through two crystals in the channeling mode.

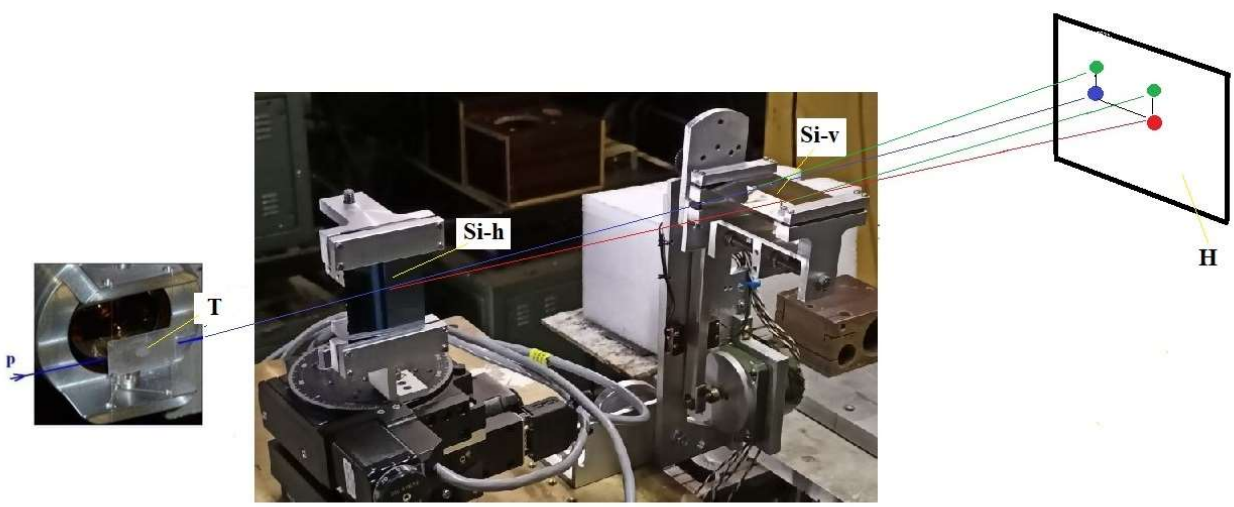


Figure 3: Configuration of the KRISTAL setup with an active target and two focusing crystals: T - active target, Si-h - horizontally focusing crystal in the goniometer, Si-v - vertically focusing crystal in the goniometer, H - scintillation hodoscope. Lines of different colors show beam deflection by crystals, explanations are shown in fig. 5a.

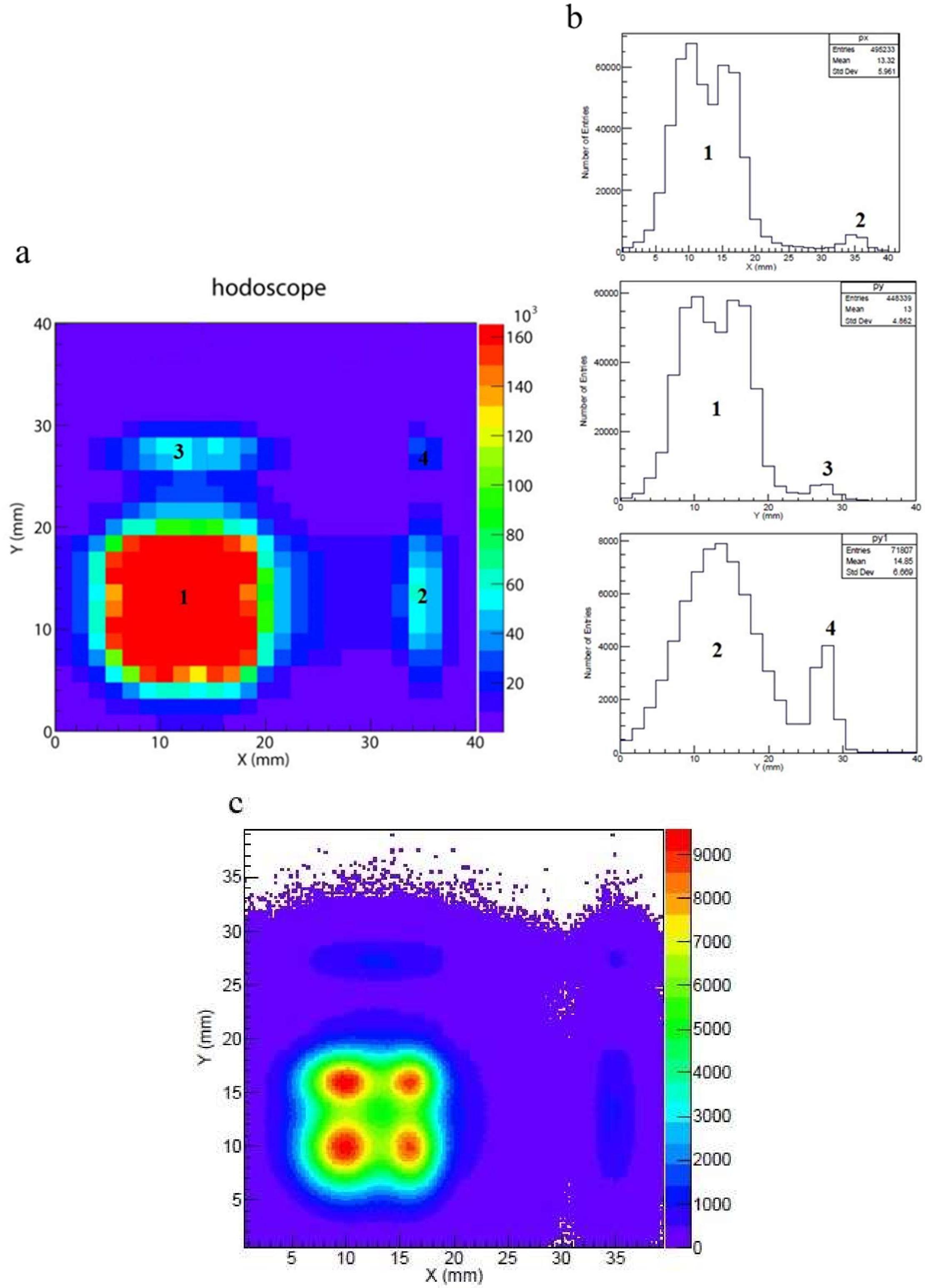


Figure 5: a - two-dimensional image of the beam profiles: 1 - undeflected 50 GeV proton beam, 2 - horizontally deflected beam by the first crystal due to channeling, 3 - vertically deflected beam by the second crystal, but not captured by the first crystal into the channeling, 4 - axially a symmetric beam with low divergence (Lindhard angle, 30 μrad) that passed through two crystals in the channeling mode. b - corresponding one-dimensional projections of the beam profiles. c - Monte Carlo simulations of the experiment.

Each of the crystals focused and deflected the beam with an expected efficiency of about 10%. The relatively low efficiency of double channeling (about 1.4%) is explained by the relatively low proton energy of 50 GeV, where the dechanneling length is ~2 cm. The efficiency of the crystal system increases sharply for TeV energies, where the dechanneling length is over 50 cm (according to the measured values [20]).

CONCLUSION

The use of such a scheme with an internal target and two crystals will make it possible to implement a new method for the formation of neutrino and muon beams at large accelerators, as discussed in [21].

REFERENCES

[1] V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, V. I. Kotov, *Crystal channeling and its application at high-energy accelerators*. Berlin, Germany: Springer, 1997.

[2] E. N. Tsyganov, "Estimates of cooling and bending processes for charged particles penetration through a monocrystal", Fermilab, Batavia, USA, Fermilab preprint TM-682, Fermilab Preprint TM-684, 1976.

[3] A. F. Elishev *et al.*, "Steering Of The Charged Particle Trajectories By A Bent Crystal", *Phys. Lett. B*, vol. 88, p. 387, 1979.

[4] A. G. Afonin *et al.*, "High-Efficiency Beam Extraction and Collimation Using Channeling in Very Short Bent Crystals", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, no 9, p. 094802, Aug. 2001.

[5] R. P. Fliller *et al.*, "RHIC crystal collimation", *Nucl. Instrum. Methods B*, vol. 234, pp. 47-56, 2005.

[6] N. V. Mokhov *et al.*, "A study of collimation and extraction of the U-70 accelerator beam using an axially oriented crystal", *Int. J. Mod. Phys. A*, vol. 25, p. 98, 2010.

[7] W. Scandale *et al.*, "Observation of channeling for 6500 GeV/c protons in the crystal assisted collimation setup for LHC", *Phys. Lett. B*, vol. 758, pp. 129-133, 2016.

[8] W. Scandale *et al.*, "Feasibility of crystal-assisted collimation in the CERN accelerator complex", *Int. J. Mod. Phys. A*, vol. 37, p. 2230004, 2022.

[9] M. A. Gordeeva *et al.*, "First results on the focusing of a 70-GeV proton beam by a curved single crystal", *JETP Lett.*, vol. 54, p. 487, 1991.

[10] V. I. Baranov *et al.*, "Highly efficient deflection of the divergent beam by bent single crystal", *Nucl. Instrum. Methods B*, vol. 95, p. 449, 1995.

[11] A. G. Afonin *et al.*, "Investigation of the focusing of a 50-GeV proton beam using a new crystal device", *JETP Lett.*, vol. 96, p. 424, 2012.

[12] W. Scandale *et al.*, "Observation of focusing of 400 GeV/c proton beam with the help of bent crystals", *Phys. Lett. B*, vol. 733, p. 366, 2014.

[13] A. G. Afonin *et al.*, "Short-Focus Crystal Device and Its Applications on Modern Accelerators", *Phys. Part. Nucl. Lett.*, vol. 19, no. 4, pp. 389–392, 2022.

[14] A. G. Afonin *et al.*, "Focusing crystal device for deflecting a divergent 50-GeV proton beam", *JETP Lett.*, vol. 104, pp. 12-14, 2016.

[15] W. Scandale *et al.*, "Focusing of 180 GeV/c pions from a point-like source into a parallel beam by a bent silicon crystal", *Nucl. Instrum. Meth. B*, vol. 446, pp. 15-18, 2019.

[16] W. Scandale *et al.*, "Double-crystal measurements at the CERN SPS", *Nucl. Instrum. Methods A*, vol. 1015, p. 165747, 2021.

[17] W. Scandale *et al.*, "Reduction of multiple scattering of high-energy positively charged particles during channeling in single crystals", *Eur. Phys. J. C*, vol. 79, no. 12, p. 993, 2019.

[18] W. Scandale *et al.*, "Observation of strong reduction of multiple scattering for channeled particles in bent crystals", *Phys. Lett. B*, vol. 804, p. 135396, May 2020.

[19] W. Scandale *et al.*, "Multiple scattering of channeled and non-channeled positively charged particles in bent monocrystalline silicon", *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 137, no. 7, p. 811, 2022.

[20] W. Scandale *et al.*, "Dechanneling of high energy particles in a long bent crystal", *Nucl. Instrum. Methods B*, vol. 438, pp. 38-41, 2019.

[21] A. G. Vasilyeva *et al.*, "What can bent crystals do on modern accelerators", presented at RuPAC'23, Novosibirsk, Russia, September 2023, this conference.

OPTIMIZATION OF THE RESONATOR GEOMETRY OF A PHOTOEMISSION ELECTRON SOURCE

N. Yu. Samarokov, M. V. Lalayan, S. M. Polozov, A. A. Batov, NRNU MEPhI, Moscow, Russia
I. V. Bandurkin, A.A. Vikharev, IAP RAS, Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract

This paper presents a comparison of the characteristics of photogun resonators of various geometries with a frequency of 2.45 GHz. For four resonator options, the electrodynamic characteristics of the structures are presented and a comparative analysis of the results is carried out.

INTRODUCTION

Electron sources based on photoemission make it possible to create electron beams with the ability to very accurately control them in time and space, high currents and high brightness. These features make photoguns indispensable in installations of various classes.

The NRNU MEPhI team is developing a one and a half cell electron photoinjector with an operating frequency of 2.45 GHz. The article describes work on optimizing the geometry of resonators and its impact on the electrodynamic characteristics.

MANUSCRIPTS

The field distribution in the photogun resonators should be 1:1, the natural frequency should be 2.45 GHz, and the peak electric field values should be 500-600 kV⁄cm. In accordance with these data, the first model was built without any roundings on the resonators. A general view of the photoinjector is presented in Figure 1. This model was configured to the necessary parameters and its electrodynamic characteristics were calculated. Figure 2 shows the distribution of the electric field along the axis of flight of the beam.

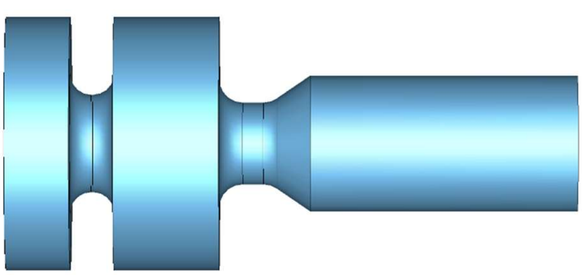


Figure 1: General view of the photoinjector without resonator roundings.

As can be seen from the electric field distribution graph, the peak values satisfy the conditions. As a result of the simulation, the value of the quality factor of this structure was obtained, which was: Q = 14957.

In order to increase the quality factor of the photoinjector, the geometry of the resonators was optimized and the influence of the size of roundings on their quality factor was studied.

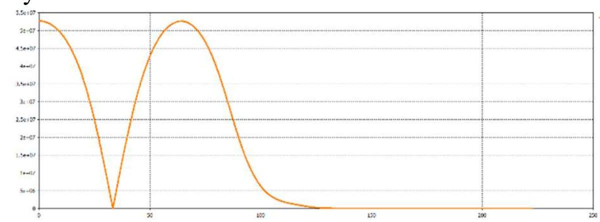


Figure 2: Electric field distribution along the axis of flight of the beam.

OPTIMIZATION OF THE CAVITIES GEOMETRY

Three variants of the geometry of the photoinjector resonators are considered. The first option is small roundings of less than 6 mm. The general view of the gun is shown in Figure 3; Figure 4 shows the distribution of the electric field along the axis of flight of the beam. This model was configured in accordance with the requirements and calculations of electromagnetic fields and electrodynamic characteristics were made.

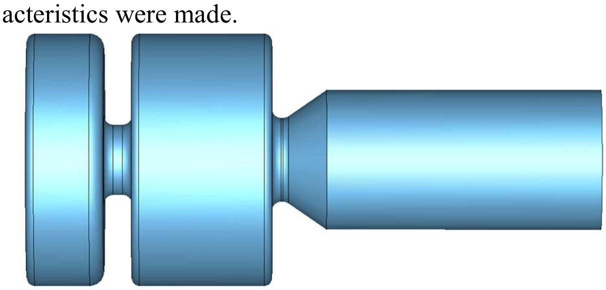


Figure 3: General view of a photoinjector with roundings less than 6 mm.

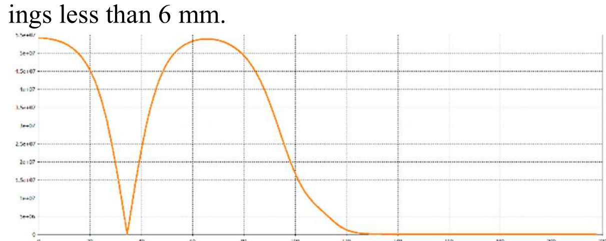


Figure 4: Electric field distribution along the axis of flight of the beam.

In this case, the peak values of the electric field are approximately 2% greater than in the original model. At the same time, the value of the quality factor became equal: Q = 17163, which is 14% more than in the geometry version without roundings on the resonators.

The next stage was a geometry variant similar to the geometry of the PITZ photoinjector [1 - 4]. A general view of the source is shown in Figure 5; Figure 6 shows the distribution of the electric field along the axis of flight of the beam. This model was configured in accordance with the requirements and calculations of electromagnetic fields and electrodynamic characteristics were made.

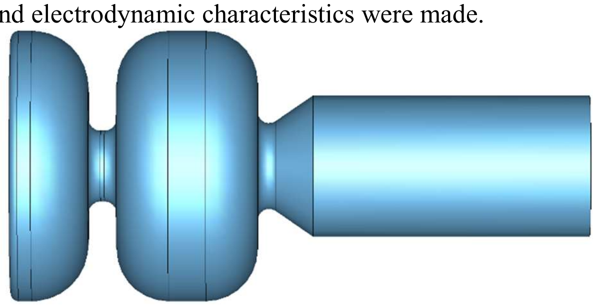


Figure 5: General view of a photoinjector similar to the PITZ source.

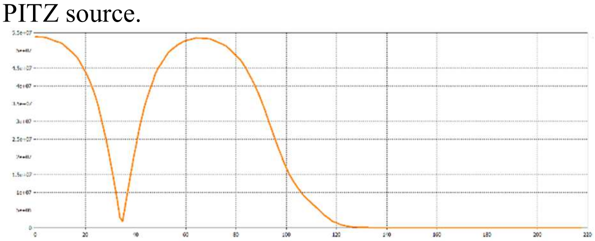


Figure 6: Electric field distribution along the axis of flight of the beam.

As can be seen from the electric field distribution graph, the peak values are similar to the previous version and approximately 2% more than in the original version. As a result of the simulation, the value of the quality factor of this structure was obtained, which was: Q = 18216, which is 21% more than in the original version.

Next, we consider a variant of the electron source, similar in its geometry to the LUCX photoinjector [5, 6, 7]. A general view of the source is shown in Figure 7; Figure 8 shows the distribution of the electric field along the axis of flight of the beam. This model was configured in accordance with the requirements and calculations of electromagnetic fields and electrodynamic characteristics were made.

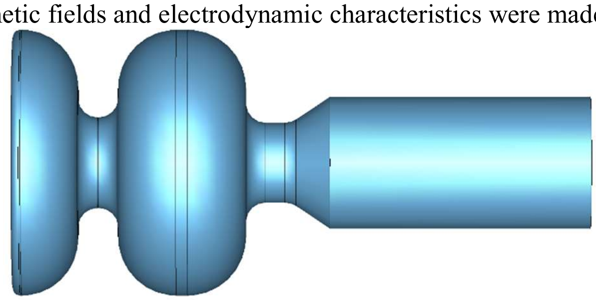


Figure 7: General view of a photoinjector similar to the LUCX source.

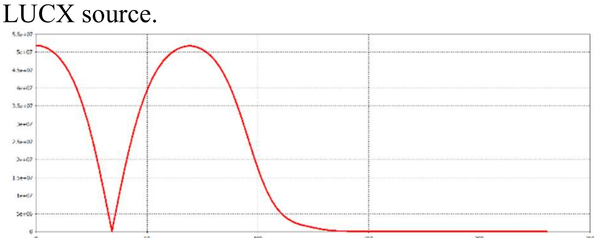


Figure 8: Electric field distribution along the axis of flight of the beam.

In this case, the peak values of the electric field are approximately equal to the values in the original version. At the same time, the value of the quality factor became equal: Q = 17640, which is 18% more than in the geometry version without roundings on the resonators. Table 1 shows the quality factor values for all geometries.

Table 1: Comparisons of quality factors for all variants of resonator geometries

Geometry option	Quality factor, Q
Primordial	14957
With roundings < 6mm	17163
Similar to PITZ source geometry	18216
Similar to LUCX source geometry	17640

CONCLUSION

As a result of the analysis of the obtained data, it is obvious that the highest quality factor can be achieved by a variant of the geometry of the resonators of the photoemissive electron source, similar to the geometry of the PITZ photoinjector. Further development and research is currently underway.

REFERENCES

[1] Krasilnikov M., Polozov S. M., Rashchikov V. I. Photoemission of Picosecond Electron Bunches with Large Charge in RF Guns //Physics of Atomic Nuclei. – 2021. – T. 84. – №. 11. – C. 1881-1885.

[2] Rimjaem S. et al. Tuning and conditioning of a new high gradient gun cavity at PITZ //power (kW). – 2008. – T. 450. – №. 600. – C. 750.

[3] Chen Y. et al. Frequency-detuning dependent transient coaxial rf coupler kick in an L-band long-pulse high-gradient rf photogun //Physical Review Accelerators and Beams. – 2020. – T. 23. – №. 1. – C. 010101.

[4] Otevrel M. et al. Report on Gun conditioning activities at PITZ in 2013 //Proc. IPAC. – 2014. – T. 14. – C. 2962-2964.

[5] Chen Y. et al. Coaxial coupler RF kick in the PITZ RF Gun //Proc. FEL'17. – 2017. – C. 422-425.

[6] Sakaue K. et al. Ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell attached rf gun //Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. – 2014. – T. 17. – №. 2. – C. 023401.

[7] Aoki T. et al. Development of an S-band multi-cell accelerating cavity for rf gun and booster linac //Proc of IPAC11, San Sebastian, Spain. – 2011.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СВЧ ПИТАНИЯ ЭЦР ИОННОГО ИСТОЧНИКА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,46 ГГц

М.С. Дмитриев, М.В. Дьяконов, С.А. Туманов
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Аннотация

ЭЦР источники ионов являются одним из основных способов получения ионов необходимой зарядности и интенсивности. Одной из важных задач при разработке таких устройств является разработка системы СВЧ питания. Определены элементы системы, необходимые для стабильной постоянной работы ЭЦР ионного источника. Проведено моделирование и оптимизация таких элементов как трехшлейфовый штыревой согласователь, разрыв по постоянному току, волноводные переходы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в НИЯУ МИФИ разрабатывается новый ЭЦР источник ионов для линейного ускорителя легких ионов с рабочей частотой 2,46 ГГц. Выбор рабочей частоты 2,45 ГГц обусловлен несколькими факторами: широким набором доступных волноводных элементов, опытом работы в этом диапазоне частот, компактностью магнитной системы, а также возможностью регулировки распределения магнитного поля внутри плазменной камеры.

Предполагается, что источник будет иметь возможность работы в двух режимах. В режиме ЭЦР источника будет обеспечено взаимодействие электромагнитного поля с плазмой на частоте электронно-циклотронного резонанса для получения слаботочного пучка двухзарядных ионов, режим СВЧ источника при высоком давлении газа внутри плазменной камеры предназначен для получения пучков протонов и однозарядных ионов с высокой интенсивностью.

СХЕМА СИСТЕМЫ СВЧ ПИТАНИЯ

Для осуществления подачи СВЧ мощности в рабочую камеру ЭЦР источника ионов была разработана система СВЧ питания, обеспечивающая стабильную передачу мощности в плазменную нагрузку. Схема такой системы представлена на Рис. 1.

Основными элементами системы питания являются магнетрон с источником питания, коаксиально-волноводный переход, ферритовый вентиль, трехшлейфовый штыревой согласователь с ручной регулировкой, разрыв по постоянному току (DC-break), баночное окно ввода мощности, волноводные переходы и рабочая камера.

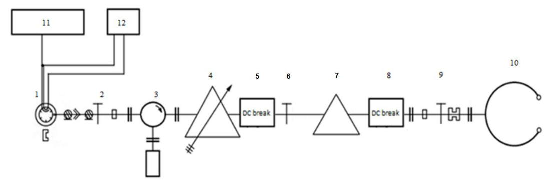


Рисунок 1: Схема системы питания ЭЦР ионного источника. (1) Магнетрон. (2) Коаксиально-волноводный переход. (3) Циркулятор волноводный. (4) Трехшлейфовый штыревой согласователь с ручной регулировкой. (5) Высоковольтный DC-break. (6) Волноводный переход с WR-340 на WR-284. (7) Баночное окно ввода мощности. (8) Низковольтный DC-break. (9) Волноводный переход с прямоугольного волновода WR-284 на Н-образный 43x12. (10) Рабочая камера. (11) Источник анодного питания магнетрона. (12) Трансформатор накала магнетрона.

ТРЕХШЛЕЙФОВЫЙ ШТЫРЕВОЙ СОГЛАСОВАТЕЛЬ

Рабочая камера с плазмой является нагрузкой с переменным во времени волновым сопротивлением, зависящим от давления газа, мощности СВЧ питания и др. факторов. Отсутствие согласования нагрузки и волноводного тракта с СВЧ генератором влечет за собой снижение КПД, а также влияет на стабильность мощности и частоты колебаний в тракте.

Для решения этой задачи для применения в разрабатываемом источнике на основе волновода сечением 72 x 34 мм был разработан трехшлейфовый штыревой согласователь, способный согласовать сопротивление плазменной нагрузки с трактом за счет изменения глубины погружения стержней, расположенных на расстоянии четверти длины волны в волноводе (Рис. 2).

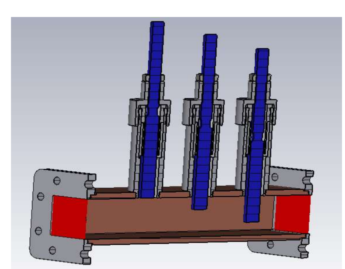


Рисунок 2: Вид трехшлейфового штыревого согласователя.

С помощью представленного согласователя было согласовано несколько видов отражающих нагрузок.

В Таблице 1 приведены значения глубины погружения штырей при согласовании короткозамкнутой нагрузки и отражающей нагрузки с ε = 7 и длиной lng = 16,24 мм.

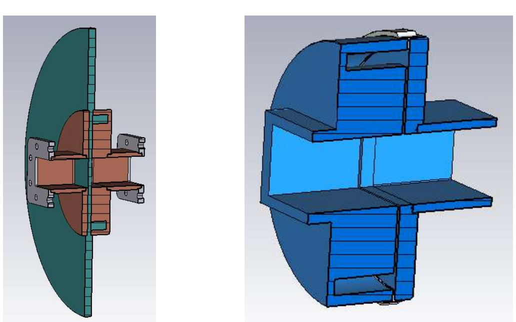
Таблица 1: Параметры отражения при согласовании отражающих нагрузок.

	Согласование Короткозамкнутой нагрузки	Согласование поглощающей нагрузки с ε = 7 и длиной lng = 16,24 мм
Коэффициент отражения	0,016-0,020i	0,011-0,013i
Коэффициент отражения, Дб	-35	-35
КСВН	1,05	1,05
Глубина погружения h1, мм	0	22,7
Глубина погружения h2, мм	19,96	10,9
Глубина погружения h3, мм	32,59	0

DC-BREAK

Плазменная камера ЭЦР ионного источника должна находится под потенциалом 80кВ. Выполнена разработка разрыва по постоянному току (DC-break), способного изолировать низковольтную часть, на которой расположены магнетрон с источником питания, циркулятор с согласованной нагрузкой, волноводный согласователь и система контроля и управления мощностью и согласованием от высоковольтной, на которой располагается сам источник ионов (Рис. 3а).

Стоит отметить, что в схеме питания ЭЦР ионного источника присутствует электрод смещения, в качестве которого выступает Н-образный волновод, который находится под потенциалом порядка 100 В. В связи с этим возникает необходимость дополнительно разделить тракт с помощью второго низковольтного разрыва по постоянному току (Рис. 3б).



а – Вид ВВ DC-break б – Вид НВ DC-break

Рисунок 3: Вид высоковольтного и низковольтного DC-break.

На Рис. 4 приведены параметры отражения от высоковольтного DC-break.

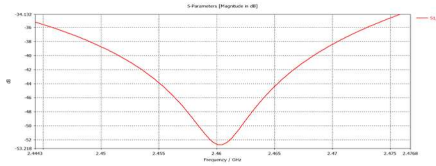
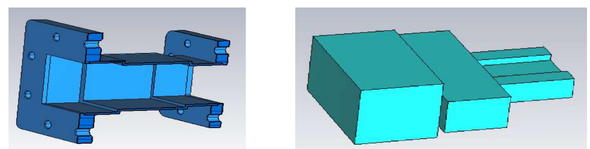


Рисунок 4: Зависимость коэффициента отражения от частоты.

ВОЛНОВОДНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Основная часть волноводного тракта имеет сечение 72 x 34 мм. Для использования готового комплекта СВЧ генератора и волноводного циркулятора на основе волновода стандарта WR-340, разработан волноводный переход с WR-340 на сечение 72 x 34 мм. (Рис. 5а).



а - волноводный переход с WR340 на WR284

б – волноводный переход с прямоугольного волновода WR-284 на Н-образный.

Рисунок 5: Волноводные переходы.

Из-за малых размеров плазменной камеры, возникает задача передачи в нее СВЧ мощности. Так как прямоугольные волноводы с соответствующими габаритами являются запредельными для частоты f = 2,46 ГГц, для передачи мощности в плазменную камеру был выбран Н-образный волновод сечения 43 x 12 мм. Соответственно, был разработан волноводный переход с прямоугольного волновода WR-284 на Н – образный (Рис. 5б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена разработка системы СВЧ питания ЭЦР ионного источника с рабочей частотой 2,46 ГГц. Приведена модель трехшлейфового штыревого согласователя, выполнен расчет ВВ и НВ DC-break, произведена оптимизация волноводных переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Туманов С.А. // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2022: Сборник научных трудов VIII Международная конференция, Москва, 22–25 марта 2022 года. - Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2022. - С. 325.

[2] M.S. Dmitriyev, M. I. Zhigaylova, K. G. Artamonov, O. A. Ivanov Magnetic System with Variable Characteristics for a 2.45 GHz ECRIS // Proc. of RuPAC’21, 2021, pp. 310-312. doi: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB38.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМА В СТРУКТУРАХ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ЛУ-2

Н.М. Кристи[1], А.И.Марченков[1], Т.В.Кулевой[1], И.А.Машин[2]
[1]НИЦ КИ – ККТЭФ, Москва [2] РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров

Аннотация

В ККТЭФ НИЦ «Курчатовский Институт» ведутся работы по разработке линейного ускорителя ЛУ-2 На этапе проектирования, для получения рабочего вакуума в структурах IS, LEBT, RFQ, MEBT, DTL не хуже $1x10^{-7}$ мбар и канала вывода пучка HEBT не хуже $1x10^{-9}$ мбар, было произведено моделирование процесса вакуумной откачки. Для этого был использован программный продукт MolFlow+, основанный на численном методе Монте-Карло.

По результатам моделирования были определены скорости откачки откачных средств для достижения соответствующего вакуума. На основании полученных результатов разработаны принципиальные схемы вакуумной откачки ЛУ-2.

ВВЕДЕННИЕ

Обычно вакуумом считают состояние газа при давлении ниже атмосферного. Однако с физической точки зрения вакуум наступает лишь тогда, когда разреженный газ приобретает качественно новые свойства. Например, по мере понижения давления газа его коэффициент теплопроводности вначале остается постоянным, а при достижении определенного разрежения наступает пропорциональная зависимость от давления. Это новое состояние газа называют вакуумом. Любое пространство, ограниченное поверхностями, содержит некоторое количество свободного газа непосредственно в объёме и связанного газа, адсорбированного на поверхностях. Адсорбированные частицы газа с поверхности диффундируют в материал стенок (абсорбируются) и могут перемещаться в них. В равновесном состоянии переход молекул (атомов) свободного газа в адсорбированное и далее в абсорбированное состояние уравновешивается обратными процессами.

Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ-2 состоит из следующих основных ключевых элементов IS - лазерный источник, LEBT - инжекционный канал, RFQ - ускоритель-форинжектор RFQ, MEBT- согласующий канал, DTL - ускоритель с трубками дрейфа, HEBT - выводной канал (Рисунок 1)

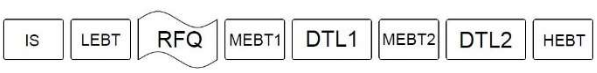


Рисунок 1 - Схема линейного ускорителя тяжелых ионов ЛУ-2.

Вакуумная система в структурах IS, LEBT, RFQ, MEBT, DTL должна обеспечивать получение рабочего вакуума не хуже $1.0x10^{-7}$ мбар, а вакуумная система канала вывода пучка HEBT должна обеспечивать получение рабочего вакуума не хуже $1.0x10^{-9}$ мбар.

Для получения результатов моделирования процесса вакуумной откачки в камерах, был использован программный продукт MolFlow+, использующий в расчетах метод Монте-Карло.

ИСТОЧНИК ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Трехмерная модель вакуумируемого объема мишенной и дрейфовой камер источника тяжелых ионов с короткой разлетной базой, построенная для вакуумного расчета, показана на рисунке 2, с длинной разлетной базой на рисунке 3.

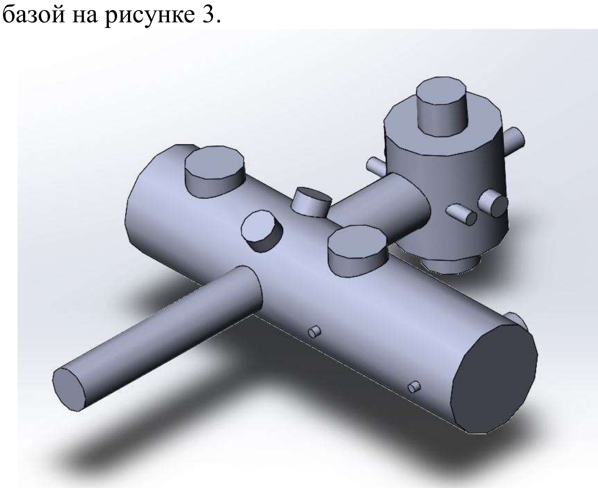


Рисунок 2 - Модель вакуумируемого объема мишенной и дрейфовой камер лазерного источника тяжелых ионов ускорителя ЛУ2 с короткой разлетной базой.

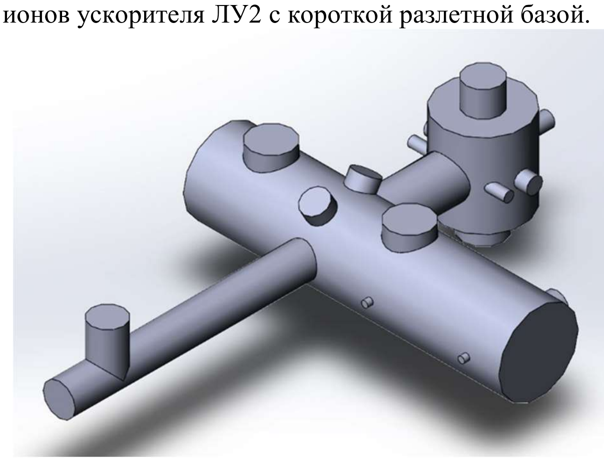


Рисунок 3 - Модель вакуумируемого объема мишенной и дрейфовой камер лазерного источника тяжелых ионов ускорителя ЛУ2 с длинной разлетной базой

Было проведено 2 моделирования: в стационарном режиме и в режиме изменения времени.

При моделировании задан параметр скорости удельного газовыделения с поверхности $q=6.3\text{x}10^{-9}$мбар*l/см^2/с (параметр получен из экспериментальных данных действующего в ККТЭФ лазерного источника тяжелых ионов). Для откачки камеры с короткой разлетной базы используются 3 турбомолекулярных насоса со скоростью откачки ~2000 л/с (Рисунок 4). Для откачки камеры с длинной разлетной базой используются 4 турбомолекулярных насоса: один со стороны канала транспортировки LEBT со скоростью откачки ~1400 л/с, два на дрейфовой камере и один на мишенной камере со скоростью откачки ~2000 л/с (рисунок 5).

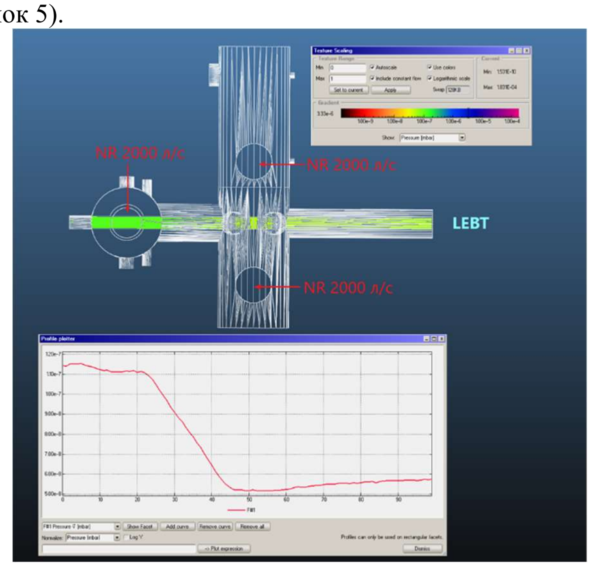


Рисунок 4 - Моделирование вакуумной системы мишенной и дрейфовой камер источника тяжелых ионов в стационарном режиме с короткой разлетной базой.

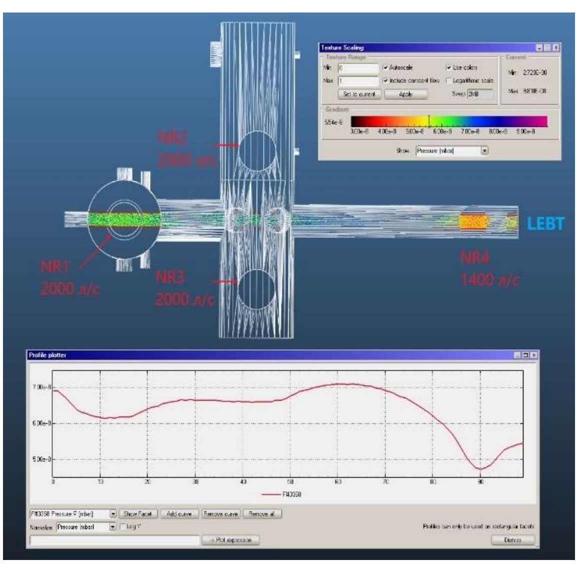


Рисунок 5 - Моделирование вакуумной системы мишенной и дрейфовой камер источника тяжелых ионов в стационарном режиме с длинной разлетной базой.

Из рисунка 4 видим, что среднее давление на плоскости пучка в откачиваемых камерах источника с короткой разлетной базой составляет ~$5.0\text{x}10^{-8}$ мбар, а из рисунка 5 среднее давление на плоскости пучка в откачиваемых камерах источника с длинной разлетной базой составляет ~$6.5\text{x}10^{-8}$ мбар.

Для имитации процесса ухудшения вакуума в режиме генерации пучка выполнено моделирование “выстрела” лазера по мишени (на 3-ей секунде на рисунке 6, 7) с последующим напуском газа в течение 100 мс, соответствующим экспериментальным данным, в результате которых вакуум во всей камере ухудшился до ~$1.0\text{x}10^{-4}$мбар. Приведенные в моделировании средства откачки были подобраны таким образом, чтобы спустя 1 секунду после импульса вакуум восстанавливался до уровня не хуже $1.0\text{x}10^{-7}$мбар.

Результаты моделирования показывают, что для обеспечения рабочего вакуума порядка ~$5.0\text{x}10^{-8}$мбар с короткой разлетной базой потребуется установить в качестве основных средств откачки три турбомолекулярных насоса со скоростью откачки не менее 2000 л/с, а для обеспечения рабочего вакуума ~$6.5\text{x}10^{-8}$мбар с длинной разлетной базой потребуется установить в качестве основных средств откачки четыре турбомолекулярных насоса: три со скоростью откачки не менее 2000 л/с и один со скоростью откачки не менее 1400 л/с (для N2).

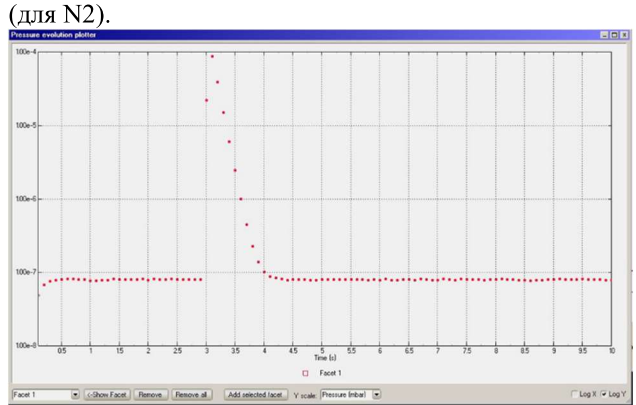


Рисунок 6 - Моделирование вакуумной системы мишенной и дрейфовой камер с короткой пролетной базой источника тяжелых ионов в режиме генерации пучка.

На основании полученных результатов разработана принципиальная схема вакуумной откачки мишенной и дрейфовой камер с короткой и длинной базой лазерного источника тяжелых ионов линейного ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 8.

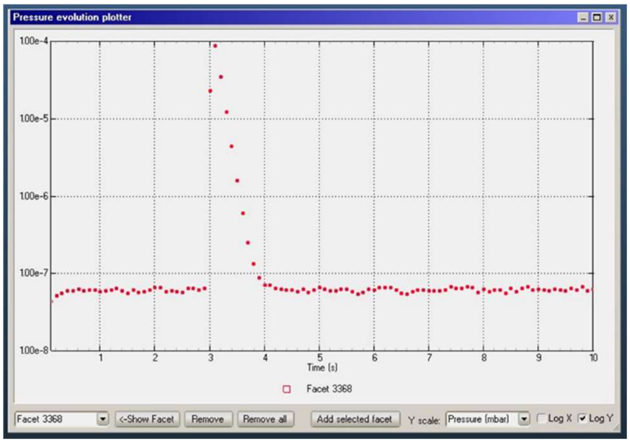


Рисунок 7 - Моделирование вакуумной системы мишенной и дрейфовой камер с длинной пролетной базой источника тяжелых ионов в режиме генерации пучка.

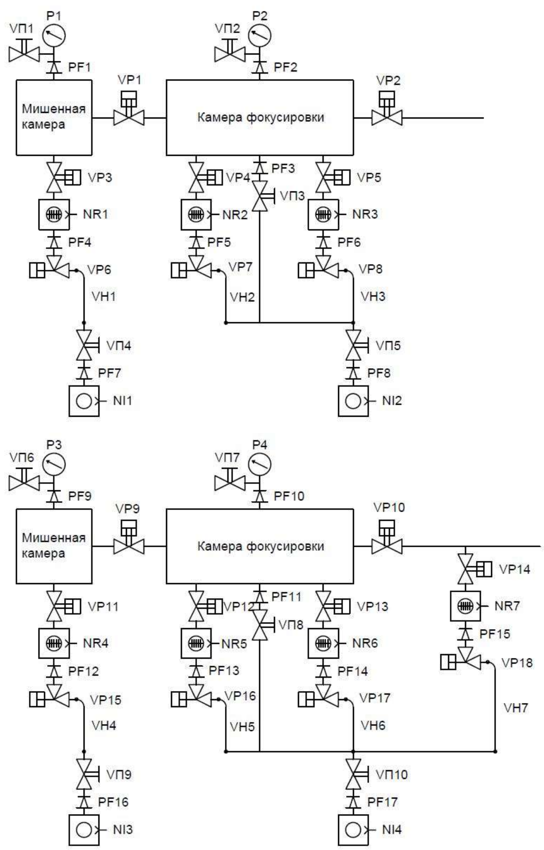


Рисунок 8 - Принципиальная схема вакуумной откачки камер лазерного источника тяжелых ионов ЛУ2.

КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ LEBT

Трехмерная модель вакуумируемого объема канала транспортировки LEBT построенная для вакуумного расчета показана на рисунке 9.

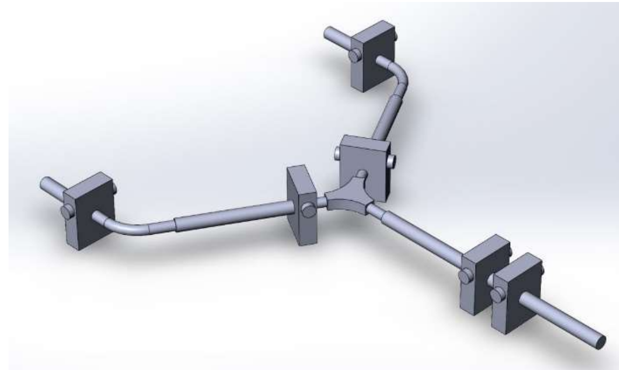


Рисунок 9 - Модель вакуумируемого объёма канала транспортировки LEBT ускорителя ЛУ2.

Канал транспортировки LEBT с точки зрения вакуума представляет собой ионопровод между источником тяжелых ионов IS и ускоряющей структуры RFQ.

При моделировании задан параметр скорости удельного газовыделения с поверхности q=1.0x10^{-9}мбар*l/см^2/с. Включены 12 турбомолекулярных насоса со скоростью откачки 700 л/с.

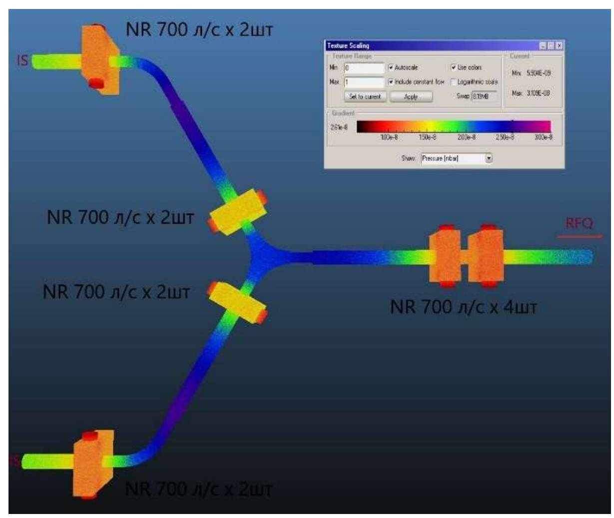


Рисунок 10 - Моделирование вакуумной системы канала транспортировки LEBT.

Из рисунка 10 видим, что среднее давление в канале транспортировки пучка LEBT составляет ~2.5x10^{-8}мбар.

Результаты моделирования показывают, что для обеспечения рабочего вакуума порядка ~2.5x10^{-8}мбар потребуется установить в качестве основных средств откачки 12 турбомолекулярных насоса со скоростью откачки не менее 700 л/с (для N2).

На основании полученных результатов, разработана принципиальная схема вакуумной откачки канала транспортировки LEBT линейного ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 11.

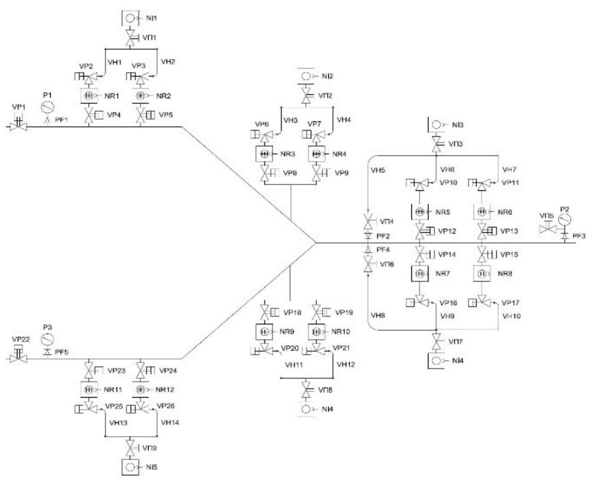


Рисунок 11 - Принципиальная схема вакуумной откачки канала транспортировки LEBT.

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА RFQ

Трехмерная модель вакуумируемого объема одной секции ускоряющей структуры RFQ, построенная для вакуумного расчета, показана на рисунке 12.

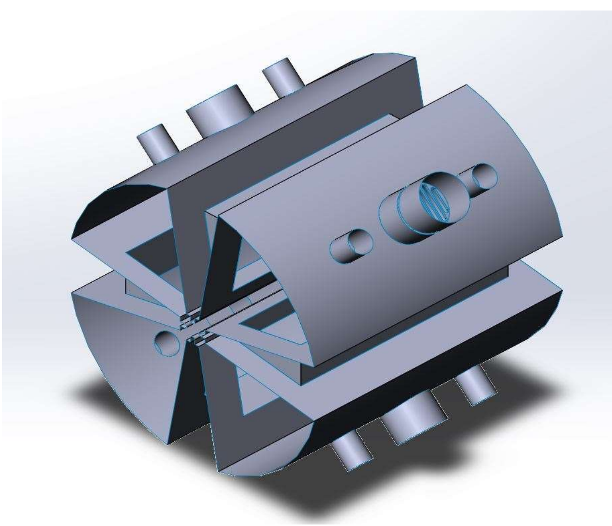


Рисунок 12 - Модель вакуумируемого объема одной секции ускоряющей структуры RFQ ускорителя ЛУ2.

При моделировании задан параметр скорости удельного газовыделения с поверхности $q=1x10^{-9}$мбар*l/см^2/с. В качестве примера, основными средствами откачки, взяты турбомолекулярные насосы со скоростью откачки 1400 л/с. Насосы будут располагаться на каждой секции ускоряющей структуры RFQ. В качестве защиты от ВЧ в расчетную модель была добавлена решетка толщиной 10мм, которая будет располагаться перед шибером насоса. В данном моделировании рассмотрена работа только одной секции.

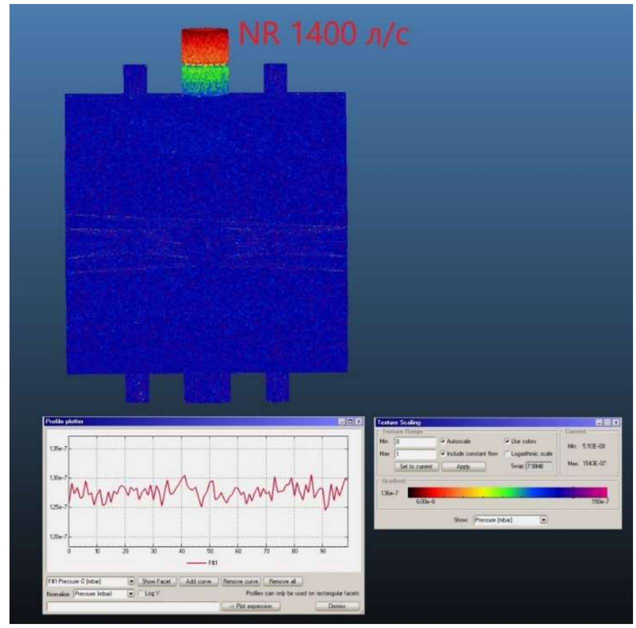


Рисунок 13 - Моделирование вакуумной системы ускоряющей структуры RFQ.

График на рисунке 13 показывает давление на плоскости пучка. Средняя степень вакуума ~1.3x10^{-7} мбар.

По результатам моделирования, чтобы обеспечить рабочий вакуум ~1x10^{-7} мбар потребуется установить на каждую секцию ускоряющей структуры RFQ в качестве основных средств откачки турбомолекулярный насос со скоростью откачки не менее 1400 л/с (для N2).

На основании полученных результатов разработана принципиальная схема вакуумной откачки ускоряющей структуры RFQ ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 14

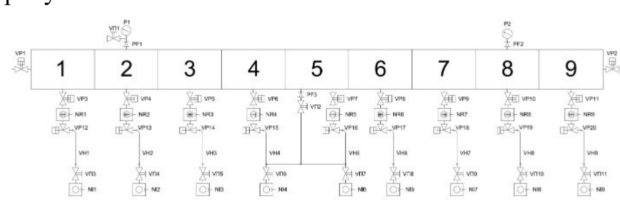


Рисунок 14 - Принципиальная схема откачки камер ускоряющей структуры RFQ.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА MEBT1

Трехмерная модель вакуумируемого объема промежуточного канала MEBT1 построенная для вакуумного расчета показана на рисунке 15.

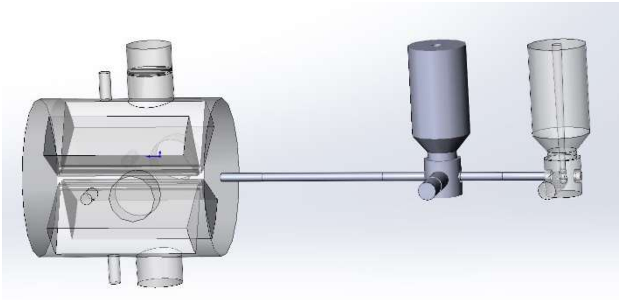


Рисунок 15 - Модель вакуумируемого объёма промежуточного канала MEBT1 ускорителя ЛУ2.

Промежуточный канал MEBT1 с точки зрения вакуума представляет собой промежуток между ускоряющей структурой RFQ и ускоряющей структурой DTL1 длиной ~1800мм, на котором расположены банчер B1 по конструкции схожие с ускоряющей структурой DTL1. Соединяет ускоряющие структуры нержавеющая камера диаметром 45мм (Рисунок 15)

В расчет были взяты одна секция ускоряющей структуры RFQ с откачным патрубком DN200 и насосом 1400 л/с и одна секция ускоряющей структуры DTL-1 с откачным патрубком DN100 и насосом 330 л/с. Так же на банчере установлен насос по 330 л/с. Перед насосом установлена решетка толщиной 10мм (Защита от ВЧ).

Для всей конструкции была задана степень удельного газовыделения с поверхности $q=1.0x10^{-9}$мбар*l/см^2/с.

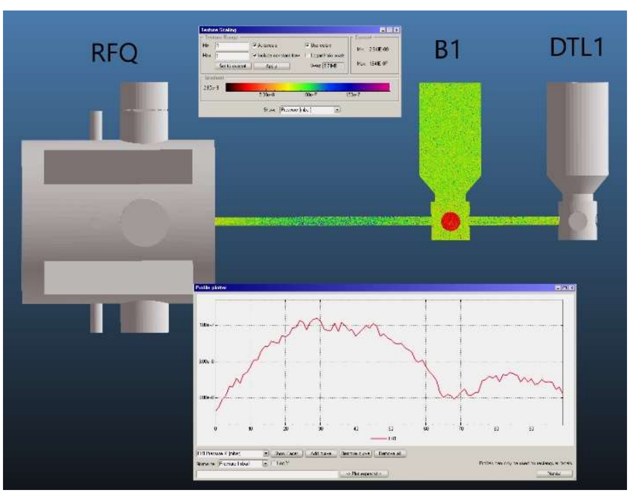


Рисунок 16 - Моделирование вакуумной системы промежуточного канала MEBT1.

График на рисунке 16 показывает степень вакуума только в промежуточном канале MEBT1. Среднее давление вдоль линии пучка составляет ~$1.0x10^{-7}$ мбар.

По результатам моделирования, чтобы обеспечить рабочий вакуум ~$1.0x10^{-7}$ мбар потребуется установить в качестве основных средств откачки турбомолекулярный насос со скоростью откачки не менее 330 л/с (для N2). Установка насоса на банчер производится аналогично установке ускоряющей структуры DTL1.

На основании полученных результатов, разработана принципиальная схема вакуумной откачки промежуточного канала MEBT1 линейного ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 17.

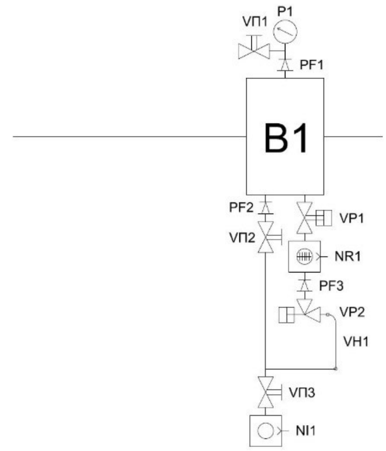


Рисунок 17 - Принципиальная схема вакуумной откачки промежуточного канала MEBT1.

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА DTL1

Трехмерная модель вакуумируемого объема ускоряющей структуры DTL1, построенная для вакуумного расчета, показана на рисунке 18.

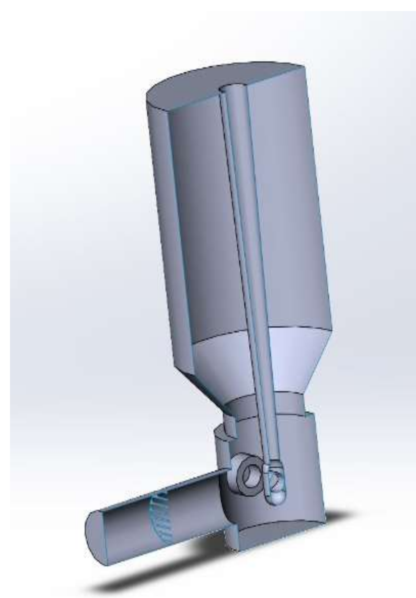


Рисунок 18 - Модель вакуумируемого объема ускоряющей структуры DTL1 ускорителя ЛУ2.

На рисунке 19 можем увидеть моделирование вакуумной системы ускоряющей структуры DTL1 с нижнем расположением откачного патрубка и решеткой в программе MolFlow. При моделировании задан параметр скорости удельного газовыделения с поверхности $q=1.0x10^{-9}$мбар*l/см^2/с. В качестве защиты от ВЧ в расчетную модель была добавлена решетка толщиной

10мм, которая будет располагаться перед шибером насоса.

В качестве турбомолекулярного насоса взят один насос со скоростью откачки 330 л/с. График на рисунке 19 показывает давление на плоскости пучка. Средняя степень вакуума составляет ~5.0x10^{-8} мбар.

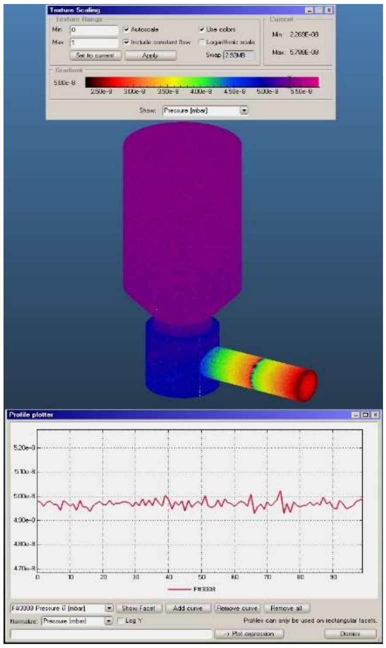


Рисунок 19 - Моделирование вакуумной системы ускоряющей структуры DTL1.

По результатам моделирования, чтобы обеспечить рабочий вакуум ~5x10^{-8} мбар потребуется установить в качестве основных средств турбомолекулярные насосы со скоростью откачки не менее 330 л/с (для N2). Установка на каждую секцию ускоряющей структуры DTL1.

На основании полученных результатов разработана принципиальная схема вакуумной откачки ускоряющей структуры DTL1 линейного ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 20.

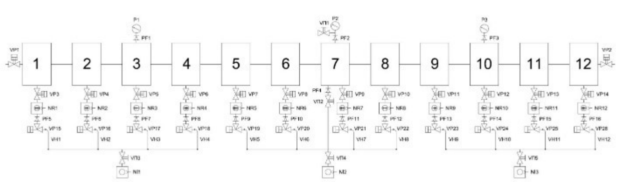


Рисунок 20 - Принципиальная схема вакуумной откачки ускоряющей структуры DTL1.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА MEBT2

Трехмерная модель вакуумируемого объема промежуточного канала MEBT2 построенная для вакуумного расчета показана на рисунке 21.

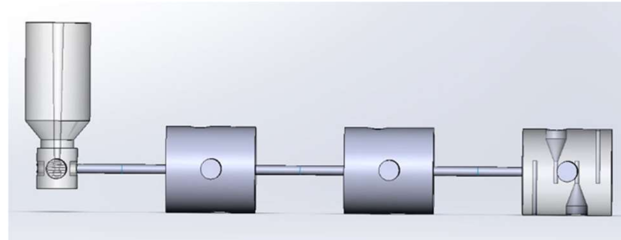


Рисунок 21 - Модель вакуумируемого объёма промежуточного канала MEBT2 ускорителя ЛУ2.

Промежуточный канал MEBT2 с точки зрения вакуума представляет собой промежуток между ускоряющими структурами DTL1 и DTL2 длиной ~2200мм, на котором расположены банчеры B3 и B4 по конструкции схожие с ускоряющей структурой DTL2. Соединяет ускоряющие структуры нержавеющая камера диаметром 45мм (Рисунок 22).

В расчет были взяты одна секция ускоряющей структуры DTL2 с откачными патрубками DN100 и насосами 330 л/с. Так же на каждом банчере установлены насосы по 330 л/с. Перед всеми насосами установлена решетка толщиной 10мм (Защита от ВЧ).

Для всей конструкции была задана степень удельного газовыделения с поверхности q=1.0x10^{-9}мбар*l/см^2/с.

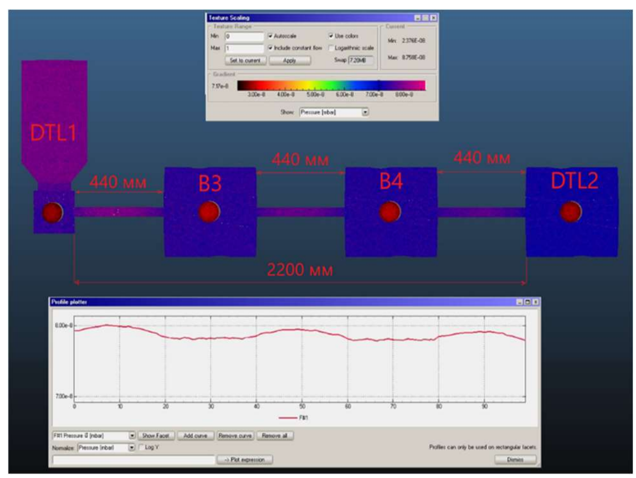


Рисунок 22 - Моделирование вакуумной системы промежуточного канала MEBT2.

График на рисунке 22 показывает степень вакуума только в промежуточном канале MEBT2. Среднее давление вдоль линии пучка составляет ~8.0x10^{-8}мбар.

По результатам моделирования, чтобы обеспечить рабочий вакуум ~8x10^{-8}мбар потребуется установить в качестве основных средств откачки на каждый банчер турбомолекулярный насос со скоростью откачки не менее 330 л/с (для N2). Установка насосов на банчеры производится аналогично установке ускоряющей структуры DTL2.

На основании полученных результатов, разработана принципиальная схема вакуумной откачки промежуточного канала MEBT2 линейного ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 23.

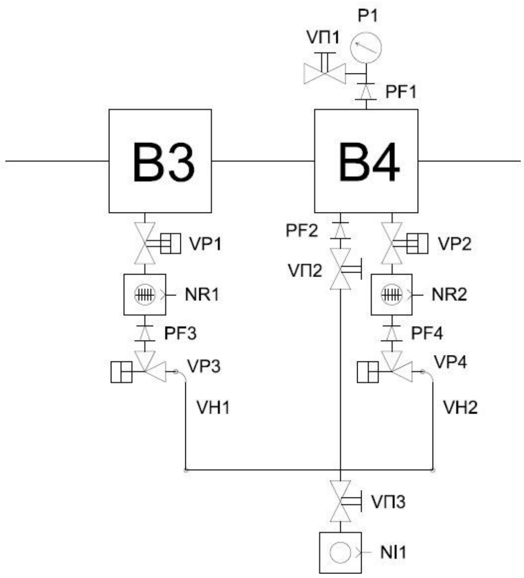


Рисунок 23 - Принципиальная схема вакуумной откачки промежуточного канала MEBT2.

УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА DTL2

Трехмерная модель вакуумируемого объема ускоряющей структуры DTL2, построенная для вакуумного расчета, показана на рисунке 24.

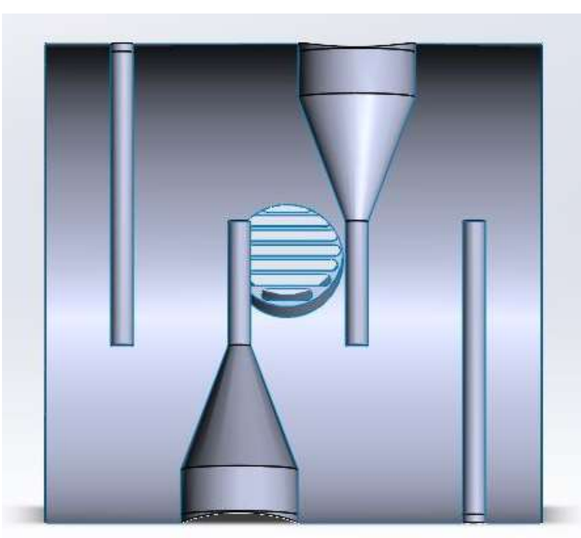


Рисунок 24 - Модель вакуумируемого объема ускоряющей структуры DTL2 ускорителя ЛУ2.

На рисунке 25 можем увидеть моделирование вакуумной системы ускоряющей структуры DTL2 с решеткой в программе MolFlow.

При моделировании задан параметр скорости удельного газовыделения с поверхности $q=1.0x10^{-9}$мбар*l/см^2/с. В качестве защиты от ВЧ в расчетную модель была добавлена решетка толщиной 10мм, которая будет располагаться перед шибером насоса. В качестве турбомолекулярного насоса взят один насос со скоростью откачки 330 л/с. График на рисунке 25 показывает давление на плоскости пучка. Средняя степень вакуума составляет $8x10^{-8}$ мбар.

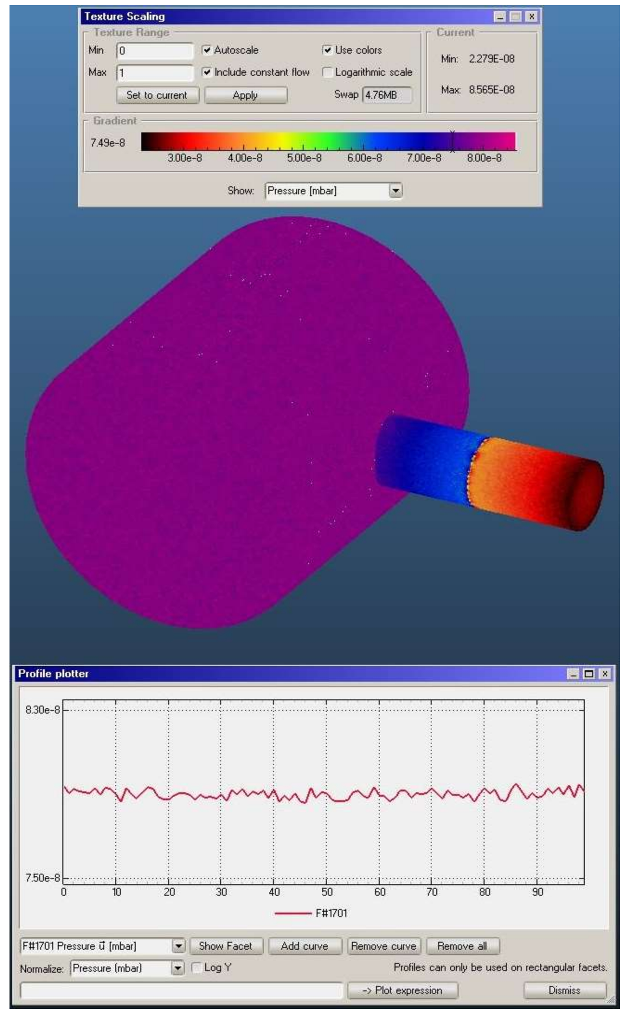


Рисунок 25 - Моделирование вакуумной системы ускоряющей структуры DTL2.

По результатам моделирования, чтобы обеспечить рабочий вакуум $8x10^{-8}$ мбар потребуется установить в качестве основных средств турбомолекулярные насосы со скоростью откачки не менее 330 л/с (для N2). Установка на каждую секцию ускоряющей структуры DTL2.

На основании полученных результатов разработана принципиальная схема вакуумной откачки ускоряющей структуры DTL2 линейного ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 26.

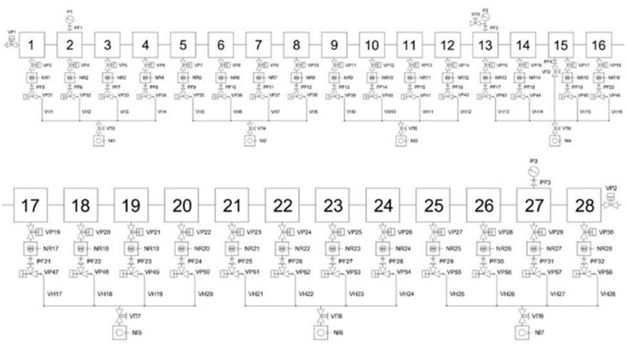


Рисунок 26 - Принципиальная схема вакуумной откачки ускоряющей структуры DTL2.

КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ HEBT

Трехмерная модель вакуумируемого объема канала транспортировки пучка HEBT, построенная для вакуумного расчета, показана серым цветом на рисунке 27.

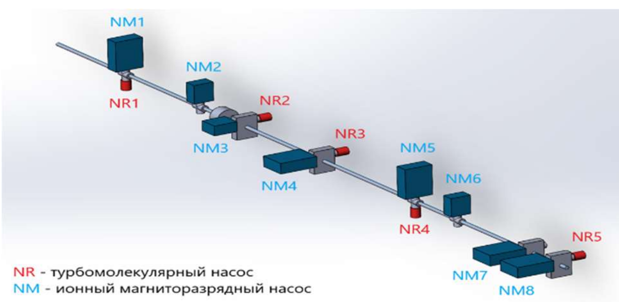


Рисунок 27 - Модель вакуумируемого объема канала транспортировки пучка HEBT ускорителя ЛУ2.

В данном варианте представлено оптимальное количество магниторазрядных насосов на канале транспортировки пучка HEBT для получения вакуума на обдирочной мишени не хуже 1.0x10^{-9} мбар. Примерную схему расстановки вакуумного оборудования можно увидеть на рисунке 27.

При моделировании задан параметр скорости удельного газовыделения с поверхности q=1.0x10^{-11}мбар*l/см^2/с. Включены 3 магниторазрядных насосов со скоростью откачки 200 л/с и 5 магниторазрядных насосов со скоростью откачки 400 л/с. Турбомолекулярные насосы предварительной откачки в расчете не учитываются. Вакуумная система канала транспортировки пучка HEBT изолирована (симуляция закрытых шиберов со стороны ускоряющей структуры DTL2 и обдирочной мишени).

Со стороны ускоряющей структуры DTL2 программа MolFlow показала давление 1.4x10^{-9} мбар, а со стороны обдирочной мишени 5.0x10^{-10} мбар.

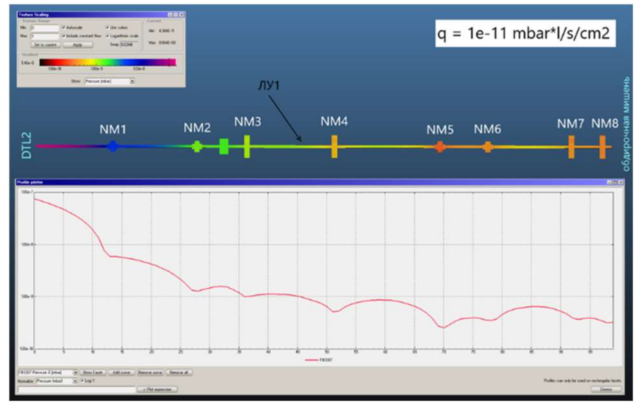


Рисунок 28 - Моделирование вакуумной системы канала транспортировки пучка HEBT.

По результатам моделирования, при соблюдении всех технологических мер в соответствии со стандартами сверхвысоковакуумных изделий в канале транспортировки пучка при работе 3 магниторазрядных насосов со скоростью откачки 200 л/с и 5 магниторазрядных насосов со скоростью откачки 400 л/с со стороны обдирочной мишени можно обеспечить рабочий вакуум ~5.0x10^{-10} мбар.

На основании полученных результатов разработана принципиальная схема вакуумной откачки канала транспортировки пучка HEBT ускорителя ЛУ2, показанная на рисунке 29.

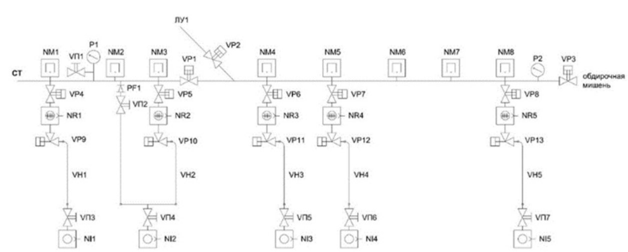


Рисунок 29 - Принципиальная схема вакуумной откачки канала транспортировки пучка HEBT.

Условные обозначения:
NR - турбомолекулярный насос
NM - насос магниторазрядный
NI - спиральный насос
VP - пневматический шибер/ пневматический угловой клапан
VH - металлический сильфонный шланг
PF - адаптер/переходник
P - измеритель давления/вакуумметр

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены результаты моделирования процесса вакуумной откачки линейного ускорителя тяжелых ионов ЛУ-2. По результатам моделирования были определены скорости откачки откачных средств для достижения соответствующего рабочего вакуума. На основании полученных результатов разработаны принципиальные схемы вакуумной откачки ЛУ-2.

DEVELOPMENT OF RF PREAMPLIFIERS FOR THE BPM OF THE NICA COLLIDER

E.V. Gorbachev, D.V. Monakhov*, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna

Abstract

The NICA BPM system is based on the Libera Hadron equipment which enables to measure the ion beam positions and intensity from the injection to the acceleration cycle end. Wideband (500 MHz) preamplifier was developed to measure signals from pick-up stations of the NICA collider with rms duration of 2 ns (4.8 ns FWHM) and repetition rate of 13 MHz. The performance of preamplifiers was tested at the last runs of the Nuclotron and Booster.

INTRODUCTION

This paper describes design and development of high sensitive preamplifiers for NICA beam position measurement system [1]. The core hardware of a BPM system consists of:

1. BPM pickup station of two types: stripline (50 Ohm) and capacitive (80 pF);
2. Wideband preamplifiers (fig.1), which provide signals from pickup stations in various operating modes of the accelerator differentiated by duration and intensity of the bunches, to support orbit measurements and correction at both low and high beam intensity;
3. BPM read-out electronics (Libera Hadron digitizer), which processes pickup signals and calculates beam orbit.

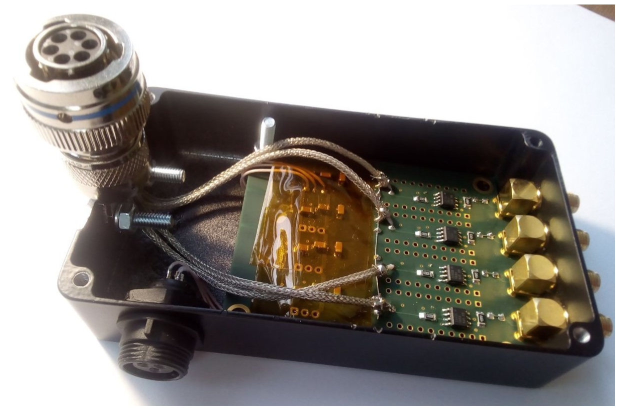


Fig. 1. Booster and Nuclotron preamplifier.

MEASUREMENT METHODS

Preamplifier for BPM system (Fig.2) was developed using wideband (500 MHz) Unity-Gain Stable, FET-Input operational amplifier OPA656. It was successfully tested during last Booster and Nuclotron runs. Nuclotron and Booster preamplifiers were designed for capacitive pickup stations and will be saturated if used in the collider. Collider will have very short ion bunches (rms 2ns. 4.8ns FWHM) with repetition rate of 13 MHz. To address this we use 50 Ohm input resistors instead of 100 kOhm (R3, fig.2), consequently, the bunch signal will be differentiated (fig 3).

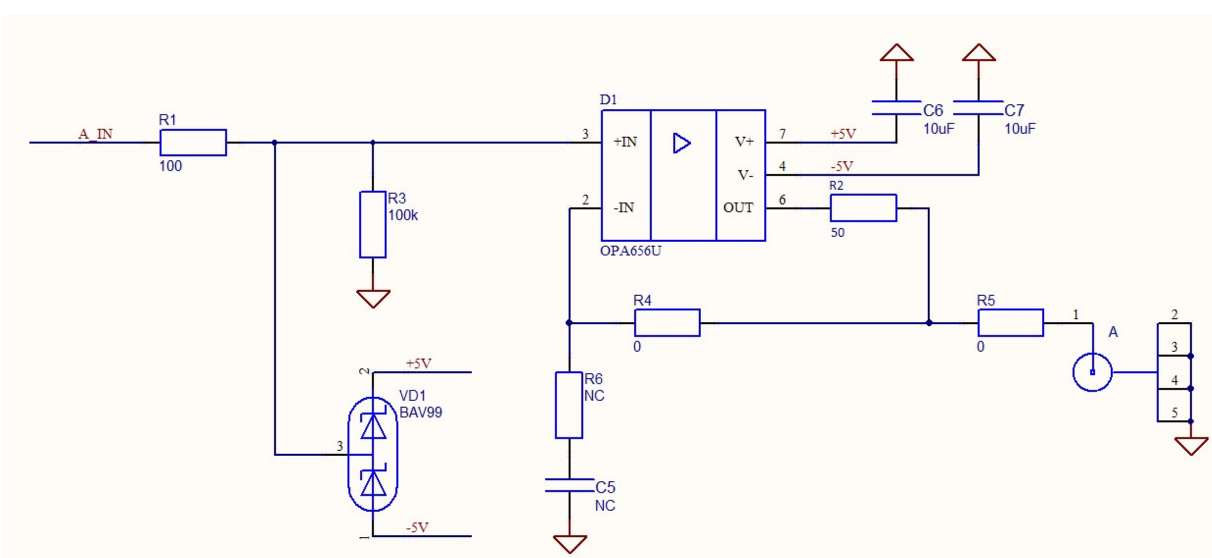


Fig. 2. Booster and Nuclotron preamplifier schematics.

*monahov@ jinr.ru

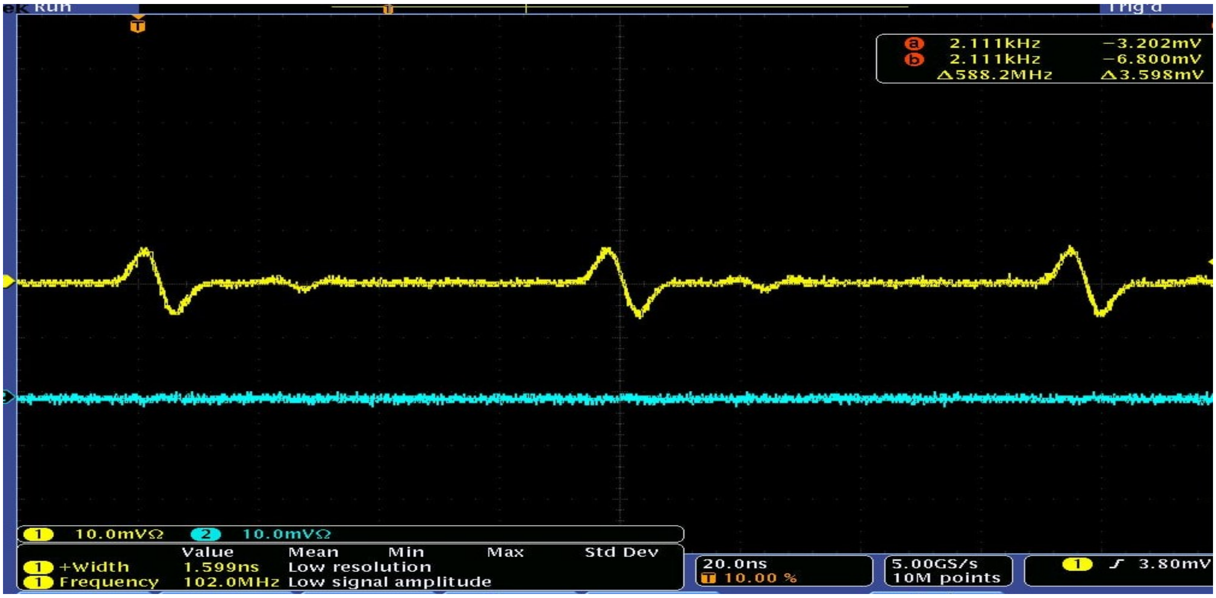


Fig. 3. Signal from capacitive electrodes loaded by 50 Ohm.

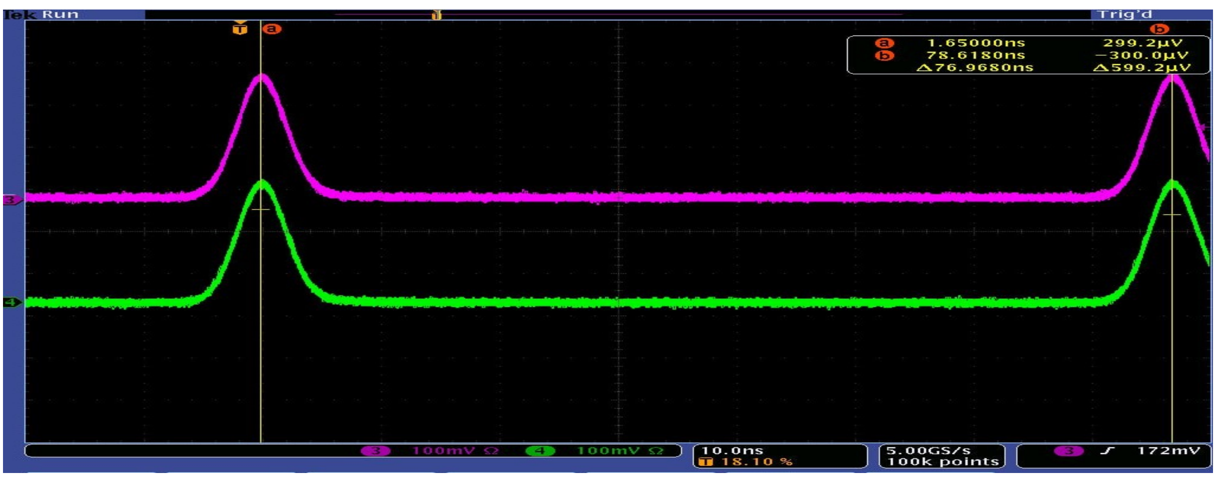


Fig. 4. Restored signals.

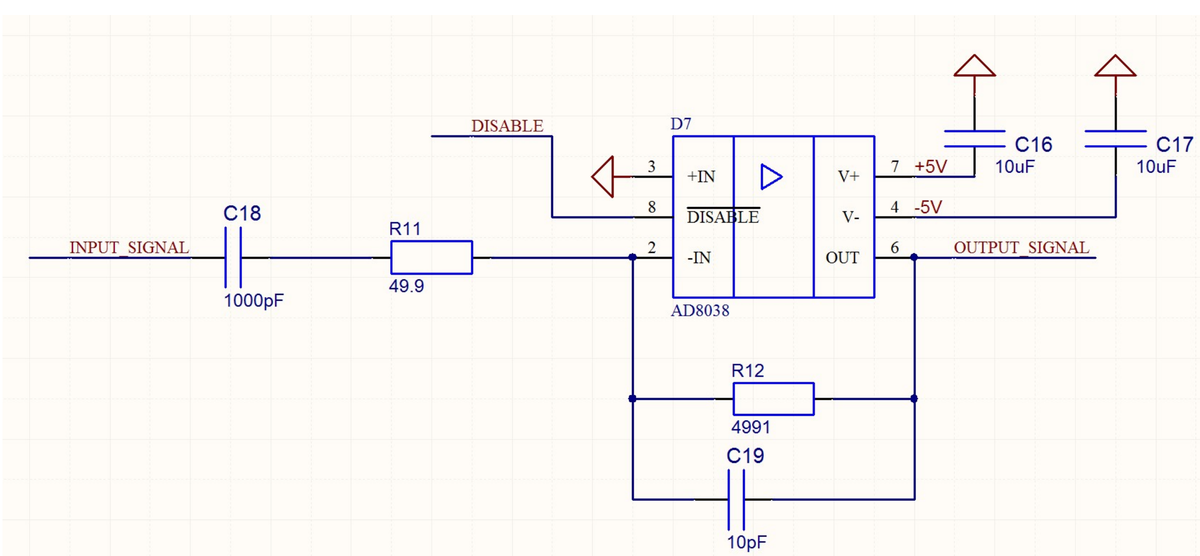


Fig. 5. Integrating preamplifier circuit.

To restore differentiated signals new integrating preamplifier was developed. Its circuit diagram (Fig.5) was tested using Tektronix AWG4162 signal generator. Signals were successfully restored (Fig.4). Further details and quantitative expression for the BPM properties can be found in other review articles [2]–[8].

At low beam intensity, used for collider tuning, the restored signals will be too small for measurement. That's why we need to switch preamplifier between two operation modes – integration (50 Ohm input resistance) and non-inverting amplification (100 kOhm input resistance). For switching signals we use AD8038 with disabled input. To control operation of preamplifiers Ethernet module (Fig.6) was developed with Blue Pill module (STM32 controller) and W5500 – Ethernet module. Inside STM32 a simple HTTP server was implemented to provide HTTP control commands.

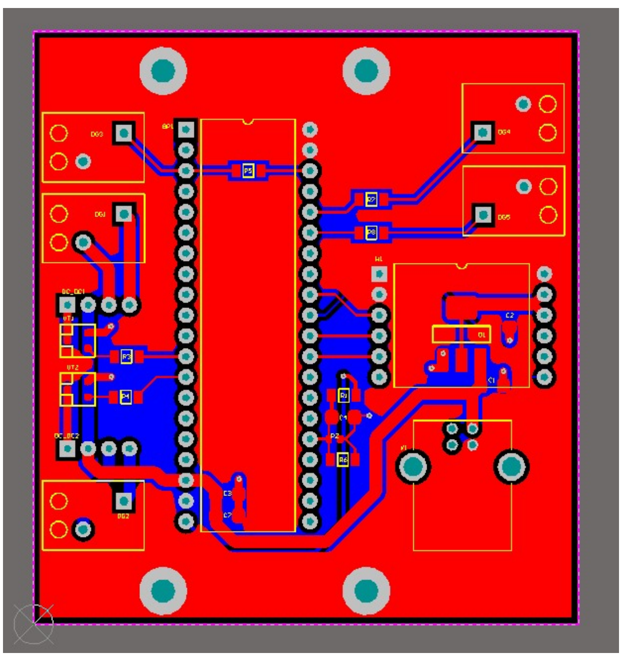


Fig. 6. Ethernet Remote Control board.

CONCLUSION

The developed preamplifier ensures the measurement of the position of the beams with a sufficiently high accuracy and is ready for mass production.

REFERENCES

[1] F. Zimmermann. Measurement and Correction of Accelerator Optics. Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), Stanford University, Stanford, CA 94309, USA, SLAC-PUB-7844, June 1998.

[2] R.E. Shafer, Proc. Beam Instr. Workshop BIW 89, Upton, p. 26, available e.g. at www.bergoz.com/products/MX-BPM/MX-BPM-downloads/files/Shafer-BPM.pdf (1989).

[3] S.R. Smith, Proc. Beam Instr. Workshop BIW 96, Argonne AIP 390, p. 50 (1996).

[4] G.R. Lambertson, Electromagnetic Detectors, Proc. Anacapri, Lecture Notes in Physics 343, 39, Springer-Verlag, p. 380 (1988).

[5] E. Schulte, in Beam Instrumentation, CERN-PE-ED 001-92, revised Nov. 1994 p. 129 (1994).

[6] D.P. McGinnis, Proc. Beam Instr. Workshop BIW 94, Vancouver, p. 64 (1994).

[7] J.M. Byrd, Bunched Beam Signals in the time and frequency domain, in Proceeding of the School.

[8] Ion Beam Measurement, Montreux, p. 233 World Scientific Singapore (1999).

QUASI-FROZEN SPIN LATTICE FOR EDM SEARCH AND ITS MATRIX PROPERTIES

A. Melnikov*, A. Aksentyev, Y. Senichev, S. Kolokolchikov
Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The basic idea to search for the Electric Dipole Moment (EDM) of charged particles in a storage ring was first proposed by the BNL. It assumes observation of the vertical build-up of beam polarization caused by the EDM in a so-called Frozen Spin (FS) lattice. The latter is composed of electrostatic deflectors to keep the momentum of the beam aligned with the direction of a polarization vector. However, this concept can be realized only for particles with positive magnetic anomaly (G), e.g., protons, and requires a lattice to be designed specifically for this purpose.

To perform the EDM experiments with particles characterized with positive and negative G one can use Quasi-Frozen Spin (QFS) lattice. It can be realized on the basis of the existing synchrotron, e.g. NICA, with magnetic arcs and additional E+B elements at straight sections (SS). So, that the net in-plane rotation of the spin-vector in the arcs is compensated in the E+B deflectors.

The main features of the QFS lattice were calculated in the spinor formalism, such as a spin-tune and a direction of the invariant spin axis. As the radial field perturbations play a crucial role in the EDM measurement procedure, the difference of FS and QFS lattices was investigated in this regard. The data for estimation of the QFS resonance strength are also presented.

SPINOR FORMALISM

Spin-vector of a particle $\vec{S}$ at each elemnt of a storage ring with electric $\vec{E}$ or magnetic $\vec{B}$ field precesses around the *local* $\vec{\Omega}$ with a frequency determined by the T-BMT equation:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times (\vec{\Omega}_{MDM} + \vec{\Omega}_{EDM}), \tag{1a}$$

$$\vec{\Omega}_{MDM} = \frac{q}{m\gamma}\Big[(\gamma G + 1)\vec{B}_\perp + (1+G)\vec{B}_\parallel - $$

$$-\gamma\left(G + \frac{1}{\gamma+1}\right)\frac{\vec{\beta}\times\vec{E}}{c}\Big], \tag{1b}$$

$$\vec{\Omega}_{EDM} = \frac{q\eta}{2m}\left[\vec{\beta}\times\vec{B} + \frac{\vec{E}}{c}\right]. \tag{1c}$$

Here m, q — mass and charge of a particle; $\beta = v/c$, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ — relativistic beta and Lorentz factor. $\vec{B} = \vec{B}_\perp + \vec{B}_\parallel$, $\vec{B}_\parallel = (\vec{v}\cdot\vec{B})\vec{v}/v^2$. Anomalous magnetic moment $G = \frac{g-2}{2}$, g — gyromagnetic ratio. Dimensionless η factor is connected to the EDM value d and spin s of a particle: $d = \frac{\eta g}{2mc}s$.

* alexei.a.melnikov@gmail.com

After each element the $\vec{S}$ is rotated around $\vec{\Omega}$ at an angle $\phi = \Omega dt$ that gives a hint that spin motion can be described in matrix notation. The latter is also motivated by the fact that the key measured values in the experiment are the spin-tune ν_s and the direction of the invariant axis $\vec{n}$ at the observation point. These properties are the *integral* characteristics of the ring and can be easily calculated in the spinor formalism.

Here the main features of the spinor algebra [1] are presented briefly. The coordinate frame is specified by the indices: (1,2,3)=(radial outward, longitudinal forward, vertical up). The Pauli matrices are: $\vec{\sigma}$=(σ_1,σ_2,σ_3). $\vec{\sigma}=\left(\begin{bmatrix}0&1\\1&0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}0&-i\\i&0\end{bmatrix},\begin{bmatrix}1&0\\0&-1\end{bmatrix}\right)$. The rotation operator M at an angle ϕ around $\vec{n}$ is presented via:

$$M = exp\left[-i(\vec{\sigma}\cdot\vec{n})\frac{\phi}{2}\right] = cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - i(\vec{\sigma}\cdot\vec{n})\,sin\left(\frac{\phi}{2}\right). \tag{2}$$

For a storage ring comprising N elements the total Map is:

$$M = M_N M_{N-1}\dots M_2 M_1. \tag{3}$$

From (2) and (3) it is evident that at an observation point at azimuth θ:

$$cos(\pi\nu_s) = \frac{1}{2}Tr(M(\theta)). \tag{4}$$

$$\vec{n}(\theta) = \frac{i/2}{sin(\pi\nu_s)}Tr(\vec{\sigma}M(\theta)). \tag{5}$$

For an element rotating $\vec{S}$ around the vertical axis at an angle ϕ, e.g. bend dipole or Wien filter (WF) the rotation operator takes the form:

$$M_{Dip,WF} = cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - i\sigma_3 sin\left(\frac{\phi}{2}\right). \tag{6}$$

For a radial perturbation rotating $\vec{S}$ at an angle ψ the rotation operator is:

$$M_{Perturb} = cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - i\sigma_1 sin\left(\frac{\psi}{2}\right). \tag{7}$$

FROZEN SPIN LATTICE

First let us examine the FS lattice for EDM search [2]. The ideal unperturbed lattice has an identical spin transfer Map by intent: $M = I$. The same is true for each segment of the ring. If N radial perturbations ψ_i are present (Fig. 1), then from the observation point in a SS the structure is equivalent to:

$$\begin{aligned} M = I\cdot&\left[cos\left(\frac{\psi_N}{2}\right) - i\sigma_1 sin\left(\frac{\psi_N}{2}\right)\right]\cdot\\ I\cdot&\left[cos\left(\frac{\psi_{N-1}}{2}\right) - i\sigma_1 sin\left(\frac{\psi_{N-1}}{2}\right)\right]\cdot\dots\\ =&\ cos\left(\frac{\sum_{i=1}^N \psi_i}{2}\right) - i\sigma_1 sin\left(\frac{\sum_{i=1}^N \psi_i}{2}\right). \end{aligned} \tag{8}$$

Applying (4) and (5) to (8) we get:

$$\nu_s = \frac{\sum_{i=1}^{N} \psi_i}{2\pi}. \tag{9a}$$

$$\vec{n} = \vec{n}_r, unless \sum_{i=1}^{N} \psi_i = 0. \tag{9b}$$

Here all rotations do commute due to identical insertions in between. That is equivalent to accumulating the exponent phase in (2). Each radial perturbation results in $\vec{n}$ pointing strictly radial in a SS. And from (9a) it follows that the measured spin-precession frequency is the arithmetic average of local frequencies Ω_i given by the T-BMT equation (1).

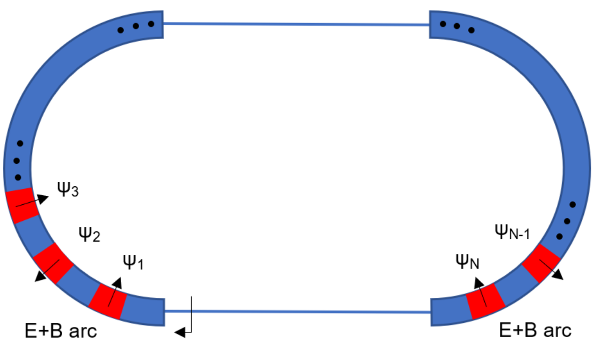


Figure 1: Frozen Spin lattice comprising 2 E+B arcs with N radial perturbations.

QUASI-FROZEN SPIN LATTICE

Unperturbed Lattice

Now let us investigate the QFS lattice consisting of 2 magnetic arcs and 2 WF insertions in a SS, rotating $\vec{S}$ at angles ϕ_{Dip} and ϕ_{WF} respectively [3,4]. The total Map of the ring is:

$$M = \left(M_{WF} \cdot M_{Dip}\right)^2 = \\ cos\left(\phi_{WF} + \phi_{Dip}\right) - i\sigma_3 sin\left(\phi_{WF} + \phi_{Dip}\right). \tag{10}$$

$$\nu_s = \frac{\phi_{WF} + \phi_{Dip}}{\pi}. \tag{11a}$$

$$\vec{n} = \vec{n}_{vert}, unless \tag{11b}$$

$$\phi_{WF} + \phi_{Dip} = 0. \tag{11c}$$

Here the QFS-resonance condition (11c) means that the $\vec{S}$ is rotated in WF opposite to the arc and restores its orientation. The formal solution for the idealized lattice omits the resonance case.

QFS Lattice with a Single Perturbation

Now let us investigate the QFS lattice with a single radial perturbation in the arc (Fig. 2) in a QFS resonance state (11c). The total Map of the ring is:

$$M = I \cdot M_{WF} \cdot M_{Dip}(\phi_2) \cdot M_{Perturb}(\psi) \cdot M_{Dip}(\phi_1) = \\ cos\left(\frac{\psi}{2}\right) - i\sigma_1 cos\left(\phi_1\right) sin\left(\frac{\psi}{2}\right) + i\sigma_2 sin\left(\phi_1\right) sin\left(\frac{\psi}{2}\right). \tag{12}$$

$$\nu_s = \frac{\psi}{2\pi}. \tag{13a}$$

$$\vec{n} = \left[cos\phi_1, -sin\phi_1, 0\right]. \tag{13b}$$

From (13b) it is visible that in this case the $\vec{n}$ is not radial at the observation point. It coincides with the radial direction at the point of a perturbation.

To perform the EDM experiment it is mandatory to inject the beam in the Counter-ClockWise (CCW) direction to eliminate the systematic effects during the measurement [2,5]. One can show that the Map for the CCW case is:

$$M = M_{Dip}(\phi_1) \cdot M_{Perturb}(-\psi) \cdot M_{Dip}(\phi_2) \cdot M_{WF} \cdot I. \tag{14}$$

Here the $\vec{n}$ direction flips 180° that allows to subtract the MDM rotations in both cases.

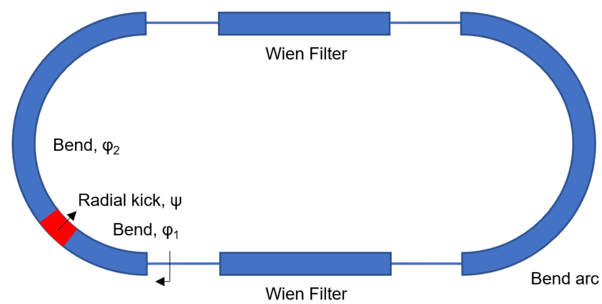


Figure 2: Quasi-Frozen Spin lattice with a single radial perturbation in the arc.

QFS Lattice with N Radial Perturbations

To perform the EDM experiment it is important to predict the direction of the $\vec{n}$ at the observation point and ν_s. For the latter we need the magnitude of the measured spin-rotation frequency and its relation with the local T-BMT (1) rotations at each element.

For this purpose we investigate the QFS lattice with N radial perturbations ψ_i (Fig. 3). Here we subdivide the lattice in N sectors with sequential rotations at angles ϕ_i and ψ_i around the vertical and radial directions. We assume that radial fields act as perturbations, so that $\psi_i << 1$. For a lattice with a number of sectors $N >> 1$ it is also reasonable to state that $\phi_i << 1$. The spin transfer Map of the ring is:

$$M = \prod_{i=N}^{1} M_{Perturb}(\psi_i) \cdot M_{Dip}(\phi_i). \tag{15}$$

Expanding the product by induction and keeping terms up to 2nd order in (ϕ,ψ) we get:

$$\begin{aligned} M &= cos\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\psi_i}{2}\right)\cdot cos\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\phi_i}{2}\right) \\ &-i\sigma_1 cos\left(\frac{\phi_1}{2}\right)cos\left(\frac{\phi_2}{2}\right)\dots cos\left(\frac{\phi_N}{2}\right)sin\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\psi_i}{2}\right) \\ &+\frac{i}{4}\sigma_2 s_{ij}\phi_i\psi_j \\ &-i\sigma_3 cos\left(\frac{\psi_1}{2}\right)cos\left(\frac{\psi_2}{2}\right)\dots cos\left(\frac{\psi_N}{2}\right)sin\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\phi_i}{2}\right) \\ &+o(\phi,\psi)^2, where\ s_{ij}=\begin{cases}1, i\le j\\ -1, i>j\end{cases}. \end{aligned} \tag{16}$$

Applying the QFS resonance condition $\sum_{i=1}^{N}\phi_i=0$ we get:

$$\nu_s=\frac{\sum_{i=1}^{N}\psi_i}{2\pi}+o(\phi,\psi)^2. \tag{17a}$$

$$\vec{n}=\left[1+o(\phi,\psi),-\frac{s_{ij}\phi_i\psi_j}{4\sum_{i=1}^{N}\psi_i}+o(\phi,\psi),0\right]. \tag{17b}$$

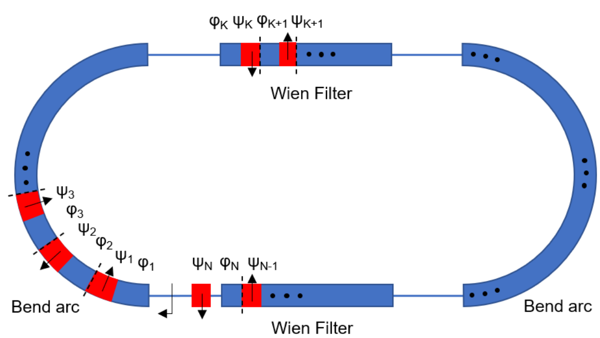


Figure 3: Quasi-Frozen Spin lattice with N radial perturbations.

The result is similar to the perturbed FS lattice (9), but here, due to anti-commutation of local rotations we get a non-zero longitudinal component of $\vec{n}$. What is more, from (17a) it follows that the measured spin-precession frequency is an arithmetic average of the local frequencies only up to second order of Taylor expansion.

It is worth noting that in the perturbed QFS lattice $\sum_{i=1}^{N}\psi_i\neq 0$. This is true because the combined E+B WF are present in the ring. With the tilt of the latter closed orbit is not perturbed but the $\vec{S}$ experiences additional rotation.

To verify the results in expressions (17) numerical modeling in COSY Infinity [6] software was performed for the NICA lattice. The radial perturbations were reproduced as the rolls of dipoles at angles corresponding to 100 um/m RMS and the closed orbit vertical deviation of 0.5 mm RMS in the quadrupoles was included. The statistical distribution of the radial component of the $\vec{n}$ is presented in (Fig. 4). The results confirm the outcome of expression (17b) of the

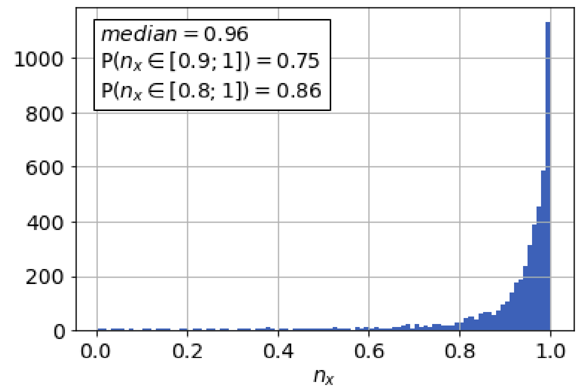


Figure 4: Histogram of the radial component of $\vec{n}$.

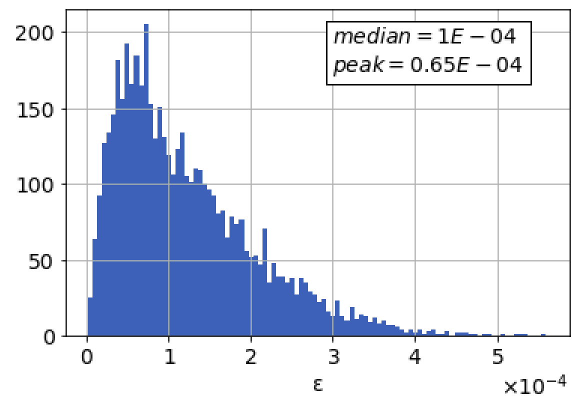


Figure 5: Histogram of the resonance strength ϵ.

presence of an additional longitudinal component of $\vec{n}$ with the prevailing radial component. In the QFS resonance the vertical component of $\vec{n}$ is absent. The statistical modeling of the QFS resonance strength ϵ was also performed to give an estimate to the expression (17a) for the planned experiment (Fig. 5). The results in Figs 4,5 are obtained for different individual realizations of misalignments with the fixed statical properties for their generation.

CONCLUSION

QFS and FS lattices were compared in terms of spin dynamics for EDM search. In the perturbed QFS structure the dominant direction of $\vec{n}$ is radial but the small longitudinal component is present due to the anti-commutation of local rotations. The measured spin-precession frequency is the weighted sum of local T-BMT frequencies up to 2nd order of Taylor expansion of the Map. But higher order terms may arise. This question is to be investigated in terms of QFS systematic effects. The expected QFS resonance strength for the mentioned machine parameters is $\epsilon\sim 10^{-4}$. The invariant spin axis flips its direction from CW to CCW injection. This allows to subtract EDM systematic effects.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Russian Science Foundation grant 22-42-04419.

REFERENCES

[1] T. Roser, "Spinor Algebra", in A. Chao, K. Mess, M. Tigner and F. Zimmermann 2013 Handbook of accelerator physics and engineering edition **2**, pp. 183–185.

[2] F. Abusaif *et al.* 2021 *Storage ring to search for electric dipole moments of charged particles – feasibility study* (Geneva: CERN Yellow Reports: Monographs) Rep. CERN-2021-003 vol **3**.

[3] Y. Senichev *et al.*, "Quasi-frozen Spin Method for EDM Deuteron Search", in *Proc. IPAC'15*, Richmond, VA, USA, May 2015, pp. 213–215. doi:10.18429/JACoW-IPAC2015-MOPWA044

[4] Y. Senichev *et al.*, "Quasi-Frozen Spin Concept of Magneto-Optical Structure of NICA Adapted to Study the Electric Dipole Moment of the Deuteron and to Search for the Axion", in *Proc. IPAC'22*, Bangkok, Thailand, June 2022, pp. 492–495. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOTK024

[5] Y. Senichev *et al.* 2017 "Frequency domain method of the search for the deuteron electric dipole moment in a storage ring with imperfections". arxiv.org/abs/1711.06512

[6] COSY Infinity, http://cosyinfinity.org

INVESTIGATION OF SPIN-FLIPPING WITHIN THE FREQUENCY DOMAIN METHOD OF SEARCHING FOR THE ELECTRIC DIPOLE MOMENT OF THE DEUTERON

A. Aksentev[1]*, A. Melnikov, Y. Senichev, S. Kolokolchikov
Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
V. Ladygin, E. Syresin and A. Butenko, Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia
[1]also at National Research Nuclear University "MEPhI," Moscow, Russia

Abstract

The present work is part of a research dedicated to the development of a method to search for particle EDMs in an existing storage ring (specifically, NICA of JINR). The method belongs to a family of methods built upon the "Frozen Spin" idea [1], one of whose features is that the momentary beam polarization vector is orthogonal to the invariant spin axis (the polarization axis); in other words, the beam used in the measurement is essentially "depolarized." Its being-depolarized is the ground of the spin-decoherence phenomenon, in view of which the notion of spin-coherence-time receives significance (to the above-mentioned method-family).

Presented are the results of an investigation of the behavior of the beam polarization upon approaching spin-resonance in a lattice realizing the so-called "Quasi-Frozen Spin" condition. The work is carried out in view of the guiding question of how rapidly the beam energy must approach the resonance value, if the beam is to be depolarized without loss of spin-coherence.

INTRODUCTION

Spin flipping and the violation of the adiabaticity condition

In the context of the present investigation the term "spin-flipping" refers to the (controlled) deviation of the beam's invariant spin axis $\bar{n}$ from its standard upward orientation (being directed by the accelerator's guide field) into the ring plane. In particular, this happens in a Frozen or Quasi-Frozen Spin type accelerator structures [4] when approaching the so-called "frozen spin" condition [1], i.e. when the lattices' spin transfer matrix is identity.

The invariant spin axis is so called because the projection of a particle's spin-vector on this axis does not change with time: $(\boldsymbol{s}\cdot\bar{n}) = \text{const}$. In other words, the beam polarization $\boldsymbol{P}_{\parallel} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\boldsymbol{s}_i\cdot\bar{n})$ remains constant. This is significant in view of the fact that the $\boldsymbol{P}_{\perp}$, perpendicular to $\bar{n}$, dissolves in time. The process bears the name of "spin-decoherence."

To ensure the preservation of the beam's polarization, the $\bar{n}$'s variation must fulfill the gyroscopic (adiabaticity) condition: $\dot{\bar{n}} \ll \omega_s$, where $\omega_s = \omega_{cyc}\cdot\nu$ is the spin precession frequency, with the unitless figure ν being called "spin tune."

* a.aksentyev@inr.ru

Motivations for spin-flipping

However, to the Frozen Spin EDM-measurement method family precisely the $\boldsymbol{P}_{\perp}$ is of interest. Such methods, whether they utilize the oscillating polarization's phase [1] or oscillation frequency [5] as the measurable observable, have the most expressive potential from the EDM-signal when the polarization vector rotates about an perpendicular axis. Since the most secure way to inject the beam polarization aligned with the $\bar{n}$ axis, spin-flipping becomes part of guiding the beam into the experimental condition.

There is another motive for spin-flipping. That is connected with systematic error control. As an example we will take the frequency-based measurement approach. In this method, the EDM is computed on the basis of an EDM-driven spin-precession frequency component estimate. First, one measures the combined (EDM + MDM) spin frequency $\omega_s^{\pm} = \omega_{EDM} \pm \omega_{MDM}$. The sign choice here depends on whether the beam circulates in the clock-wise or counter-clockwise direction (all omegas are taken as positive values). Then, the EDM estimate comes out the following:

$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{EDM} &= \frac{1}{2}\left(\omega_s^+ - \omega_s^-\right)\\ &= \omega_{EDM} + \frac{1}{2}\left(\omega_{MDM}^+ - \omega_{MDM}^-\right).\end{aligned}$$

The $\omega_{MDM}^+ - \omega_{MDM}^-$ term represents the measurement's systematic error. In order to reduce it, the beams have to be brought to a common denominator. The proposed way to accomplish that utilizes spin precession in the horizontal plane, about the vertical axis. In other words, during a measurement cycle the spin precession axis $\bar{n}$ must switch its orientation from the vertical one used in the beam adjustment phase to the radial one used in the measurement proper.

Spin-flipping in an imperfect Quasi-Frozen Spin lattice

Spin behavior has been investigated in a modification of the original NICA lattice (see Fig. 1). The modification consists of two transport channels to bypass the native straight sections. [2] Wien-filters are placed in these channels in order to realize the Quasi-Frozen Spin regime of operation. Two sextupole families are also used; these are optimized to reduce the beam spin-decoherence. [3] The lattice model also approximates a real machine's imperfection. Of the two types of imperfection of note – quadrupole displacements and bend magnet tilts about the optic axis – only the latter have been implemented. They are modeled by radial spin-kicks, which preserves the closed orbit intact. The bend magnet tilt distribution is presented in Fig. 2.

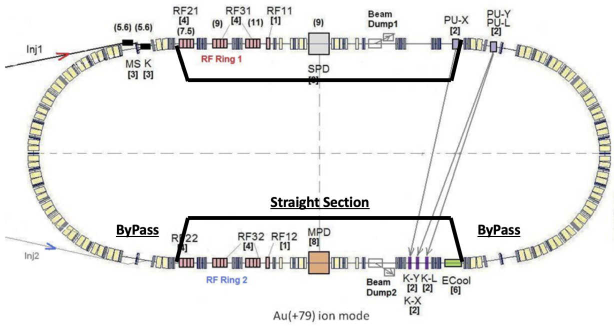


Figure 1: The NICA-ByPass lattice

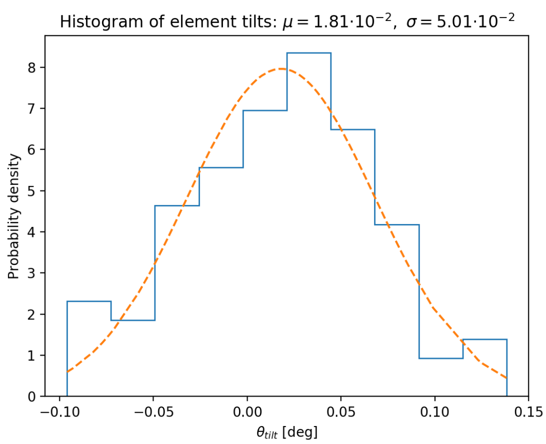


Figure 2: Bend magnets' tilt distribution

In these conditions, spin-flipping occurs automatically when the beam reaches the specific QFS-energy (in our case, 240 MeV for deuterons). The way this looks is presented in Fig. 3. One can see that at a distance from the reference energy the guide magnetic field exercises the dominant force directing the polarization axis vertically; when the energy deviation $\Delta\gamma = 0$ the radial magnetic field due to bend magnet tilts takes over and directs it radially.

MODELING

Modeling has been conducted by means of the COSY Infinity [6] environment. The results presented in Fig. 4. Two metrics have been utilized for comparison: polarization, computed as $\boldsymbol{P} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{s}_i \cdot \bar{n}$, and spin-dispersion, computed as the root mean square of $\boldsymbol{s}_i \cdot \boldsymbol{s}_0$ (with $\boldsymbol{s}_0$ being the reference particle's spin-vector).

As was explained in the previous section, our goal in spin flipping is to get a zero-polarizarion (but spin-coherent) beam. This is achieved when the polarization axis' rate of change sufficiently exceeds the spin frequency $\omega_{cyc}\nu$. The two cases presented sit in the intermediate zone, when

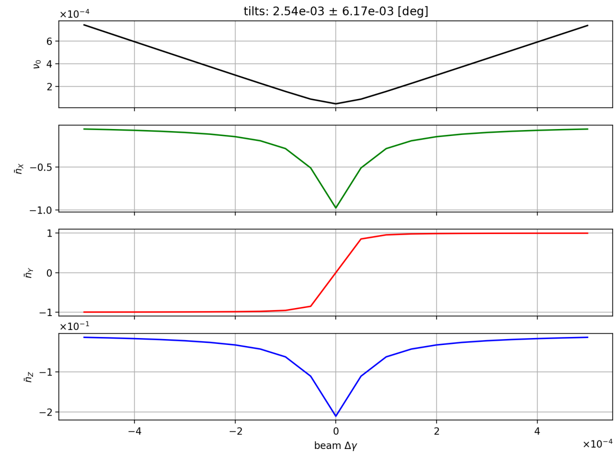


Figure 3: Spin tune and invariant spin axis components' variation in the neighborhood of QFS energy. **Top panel**: reference particle spin tune ν_0; **other panels**: invariant spin axis' radial, vertical, and longitudinal components respectively

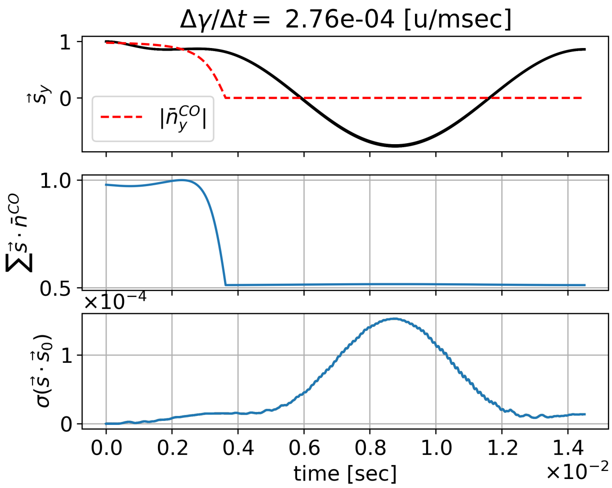
$\dot{\bar{n}} \approx \omega_{cyc}\nu$. In the first case (Fig. 4a) 50% of the polarization is preserved during spin-flipping. This means that the particle's spin-vectors follow the changing $\bar{n}$ into the horizontal plane. This would diminish the useful amplitude of the EDM-signal and should be avoided. In the other case (Fig. 4b) the $\dot{\bar{n}}$ is five times faster, resulting in the 90% drop in the polarization metric. Both cases are commensurate with respect to the $\sigma(\boldsymbol{s}_i \cdot \boldsymbol{s}_0)$ metric, which means that the violation of adiabaticity doesn't disrupt spin-coherence (the momentary polarization).

CONCLUSION

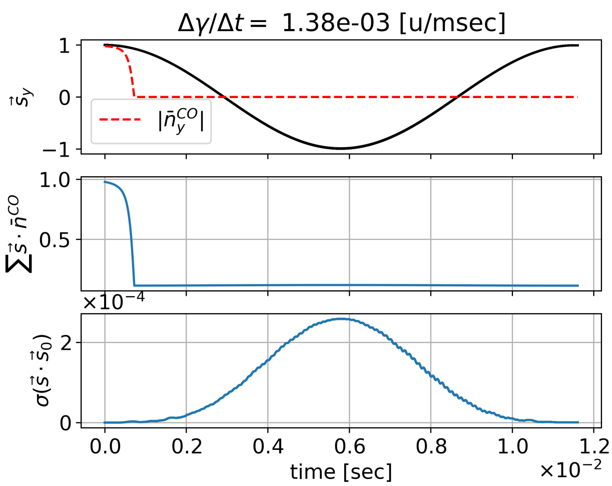
In this paper we have given an account of what "spin-flipping" is, why it is needed, why it should be done unadiabatically, and how it occurs in a Quasi-/Frozen Spin type lattice. We have modeled this process in a Quasi-Frozen Spin modification of the NICA lattice including an imperfections model. The results show that adiabaticity violations do not affect the beam spin-coherence or momentary polarization. Further improvements in the numerical model's representational value are still required, taking into account quadrupole displacements as well as bend magnet tilts about the optic axis.

ACKNOWLEDGMENTS

We appreciate the support of this study by the Russian Science Foundation grant 22-42-04419.



(a) at a slower rate



(b) at a faster rate

Figure 4: Approaching QFS-energy. **Top panel**: spin tracking results showing the spin-vectors' following the invariant spin axis $\bar{n}$; **middle panel**: the polarization beam metric (sum of spin-vector projections on the $\bar{n}$); **bottom panel**: the spin-coherence metric (root mean square of spin-vector projections on reference spin $\boldsymbol{s}_0$)

REFERENCES

[1] D. Anastassopoulos *et al.*, (srEDM Collaboration),"Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10^{-29} $e\cdot$ cm level," proposal as submitted to the BNL PAC, April 2008. `https://inspirehep.net/files/9ed0c86eedb4efd3213fc63fb8d7868f`

[2] "Bypass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search," presented at IPAC'23, Venice, Italy, May 2023.

[3] Yu. Senichev, R. Maier, D. Zyuzin, N. Kulabukhova, "Spin Tune Decoherence Effects in Electro- and Magnetostatic Structures," in *Proc. IPAC 2013*, Shanghai, China, May 2013, pp. 2579-2581. `IPAC-2013-WEPEA036`

[4] Yu. Senichev *et al.*, "Investigation of lattice for deuteron EDM ring," in *Proc. ICAP'15*, Shanghai, China, Oct. 2015, pp. 17-19. `doi:10.18429/JACoW-ICAP2015-MODBC4`

[5] A. E. Aksentev, Y. V. Senichev, "Frequency domain method of the search for the electric dipole moment in a storage ring," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1435, p. 012026, 2020. `doi:10.1088/1742-6596/1435/1/012026`

[6] COSY INFINITY. `https://www.bmtdynamics.org/cosy/`

DEVELOPMENT OF PROGRAM PACKAGES FOR SIMULATION OF ELECTRON-OPTICAL SYSTEMS

A. V. Ivanov†, The Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

Abstract

Program package WinSAM has been developed in BINP and is actively used now for calculating of electron-optical systems with space charge dominated beams, such as electron guns, collectors, accelerator systems, etc. The article describes the work aimed at further improvement of the package. The main efforts were aimed at improving and accelerating the calculation of long systems with intense beams. To do this, a module was included in WinSAM that allows calculations using PIC method with series representation of external fields, which allowed to drastically reduce the calculation time while maintaining the required level of accuracy. An example of calculating a long accelerator system is given. In addition, a transition was made to multithreaded computing using the OpenMP standard.

INTRUDUCTION

Software package WinSAM for modelling of electron-optical systems has been developed in BINP SB RAS and is widely used over the years in the Institute and other scientific centres for the development of various elements of accelerators and other physical installations [1, 2]. The WinSAM package can simulate axially symmetric EOS that can include electrodes, dielectrics, coils, permanent magnets, linear ferromagnetics. Tasks with space charge can also be simulated with help of the WinSAM package, that allows calculation of electron guns and collectors. The peculiarity of WinSAM package is the use of integral methods of calculation, allowing to maintain accuracy with relatively small number of mesh cells, that leads to a significant reduction in the calculation time compared to other methods.

The WinSAM package is successfully used for calculating electron guns, including those with high compression or low beam emittance. However, when calculating long systems with intense beams, for example, an accelerating system of a linear induction accelerator, the calculation time, due to the peculiarities of the calculation method, turns out to be too long. This makes numerical optimization of such a system practically impossible. At the same time, many applications of a beam accelerated in LIA, for example, for generating THz radiation, require very good quality. The article describes the work aimed at further improvement of the package, which will allow to quickly and accurately calculate such systems.

PARAMETRIZATION

The ability to parameterize the task has been added to the WinSAM package. Parameters can be set for the geometry of the system, potentials of electrodes, currents in coils, etc. It is possible both to iterate through the parameter values in the program itself, and to set the values and call the calculation from an external program. In the latter case, it is easy to implement an optimizing algorithm according to some target function.

MULTITHREADED COMPUTING

The use of multithreaded computing was introduced in the WinSAM package. Since WinSAM is designed to work on desktop PCs with the Windows operating system, the OpenMP standard was chosen to implement multithreaded computing. The code of computing programs was rewritten to decompose individual executable modules, thereby reducing the calculation time of typical tasks by up to 50%. Further reduction of time is difficult due to the presence of read/write operations of large amounts of data.

PARAXIAL BEAM MODEL

The main innovation that makes it possible to drastically reduce the calculation time of long systems is the new paraxial beam model based on the PIC method; this model is a deep development of the model used in the BEAM package [3]. The beam is modelled by a set of macroparticles, each of which carries the same part of the total beam current. Calculation of a particle ensemble dynamics is performed simultaneously so that the longitudinal coordinate z will be the same for all the particles. The boundary radii of the cells for describing the space charge effects increase from 0 to the beam radius and are selected so that each cell contains an equal number of particles. Such an approach leads to crowding the cells at the radius increasing and equalizing possible error for all the cells.

Values of beam radial electric field component and azimuthal magnetic field component are determined at the cell boundaries by the formulae:

$$E_{rm} = \frac{Z_0 I_p}{2\pi r_m} \sum_k \frac{1}{\beta_k}, \quad B_{\theta m} = \frac{\mu_0 I_p m N_{pc}}{2\pi r_m},$$

where $Z_0 = 120\pi(\Omega)$ is the vacuum characteristic impedance, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m is the vacuum magnetic permeability, r_m is the outer radius of m-th cell, β_k is the longitudinal speed of k-th particle related to the speed of light, I_p is the single macroparticle current, N_{pc} is the number of particles in a cell. Radial distributions of beam electric and magnetic fields are calculated by linear interpolation from node values determined by these formulas. To describe transverse potential sagging effects at the cost of the beam space charge one has introduced a concept of a drift tube contour on which a potential relative to the emitter is defined.

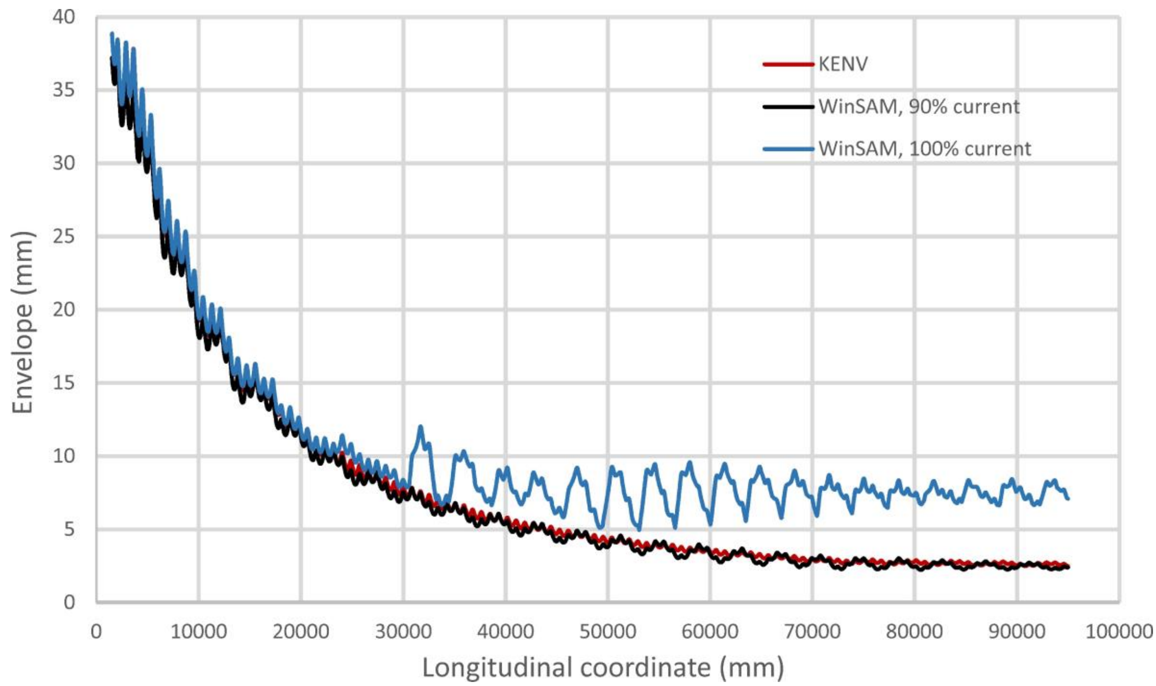


Figure 1: The beam envelope calculated in the WinSAM code versus K-V envelope as a function of longitudinal coordinate.

External electric and magnetic fields acting on a beam are calculated according to well-known formulas of decomposition of an axially symmetric field into a power series [4] up to r^5. Values of axial fields and their first five derivations are calculated for finite set of node points by WinSAM program in absence of the beam. A cubic spline interpolation is used for calculation of these values in an arbitrary z coordinate. The required calculation accuracy is provided by the high accuracy ($\sim 10^{-5}$) calculation of fields and their derivatives by WinSAM program in which the boundary element method is used.

The four-step Runge-Kutta method is used for a trajectory analysis. Therewith all the beam particle trajectories are calculated simultaneously with the same step along z axis, given in the process beginning. This step can be decreased simultaneously for all the particles in presence of strong magnetic field.

To determine the initial coordinates and velocities of particles, two methods can be used, the first of which is to set the initial parameters of the beam by the user. These parameters include the beam voltage and the total beam current. In addition, it is required to set: the initial radius of the beam and the current density distribution, maximal incline angle of the beam outer trajectory in the case of absence of a cubic aberration; relative correction of the incline angle of the beam outer trajectory through the cubic aberration; a cathode shielding coefficient. The second method consists in calculating the initial part of the system in the WinSAM package using a complete beam model and determining the required parameters in proper section.

CALCULATION OF THE LONG SYSTEM

New methods and features greatly improve the ability of WinSAM to calculate and optimize long systems with intensive beams. As an example of such a system, the accelerating system of a linear induction accelerator with discrete focusing can be considered. The beam obtained in such an accelerator can be used to generate terahertz radiation pulses [5], but it is required to ensure good quality of the beam. To obtain effective radiation generation, the emittance value should not exceed 1000 π·mm·mrad. To ensure this, numerical modeling and optimization of the system is mandatory to adjust the acceleration and transport of the beam.

Usually, programs that solve the Kapchinsky-Vladimirsky equations are used for such calculations. Unlike these programs, with the help of WinSAM program it is possible to take into account the influence of nonlinear effects in this approach, the beam model is also more physically correct. The fig. 1 shows a comparison of the beam envelope obtained in the KENV [6] (that solves Kapchinsky-Vladimirsky equations) and WinSAM programs. There is a good correspondence between the calculations of KENV and WinSAM up to a certain point, then, due to nonlinear effects, the halo of the beam develops, which cannot be described in the K-V model.

Thanks to the experience gained during numerical simulation, it became clear how the electron injector should be upgraded and how to properly ensure its alignment with the accelerator system to optimize the beam dynamics and obtain a minimum emittance [7]. The results obtained show that the beam accelerated in the LIA fully meets the requirements for its use in the FEL for generating terahertz radiation.

REFERENCES

[1] A. Ivanov, M. Tiunov, “ULTRASAM - 2D Code for Simulation of Electron Guns with Ultra High Precision”, EPAC’02, Paris, June 2002, WEPRI050, p. 1634 (2002).

[2] Ivanov A.V. WINSAM and WINMAG – new program packages for simulation of electron-optical systems. Proceeding of COOL-2019, Novosibirsk, 2019. Pp. 93–95.

[3] Tiunov M.A. BEAM-2D code package for simulation of high perveance beam dynamics in long systems. Preprint, Budker INP 98-78, Novosibirsk, 1998.

[4] M. Reiser. Theory and design of charged particle beams, WILEY-VCH VerlagGmbH and Co.KGaA, Weinheim, 2008.

[5] Nikiforov D.A., Petrenko A.V., Sinitsky S.L. et al. Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source. Journal of Instrumentation, 2021. Vol. 16, nr 11. Pp. 11024.

[6] KV-envelope code, `https://github.com/fuodorov/kenv`

[7] Nikiforov D.A., Ivanov A.V., Sinitsky S.L. et al. Evolution of the Beam Emittance in Linear Induction Accelerator with Discrete Focusing System. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 4. Pp. 31–44.

GOODNESS OF FIT OF THE ALGORITHM FOR CALCULATION AND OPTIMIZATION HIGH-ENERGY BEAM TRANSFER LINES

D.A. Amerkanov†, S.A. Artamonov, E.M. Ivanov, V.A. Tonkikh, NRC "Kurchatov Institute" - PNPI, Gatchina, Leningrad district, 188300, Russia

Abstract

The calculation of high-energy beam lines consists of tracing of the proton beam trajectories along the transport channel from the source. The PROTON_MK program code was developed to carry out such calculations using the Monte Carlo method. The beam from the accelerator is introduced in the form of a multivariate Gaussian distribution in x,x', z,z', dp/p phase space. In the case when an absorber (absorber, air section, window in the channel, etc.) is installed in the transport channel the beam parameters after the absorber are calculated using the GEANT4. The output file of this code can be used as input for the program. The program allows calculation of any beam parameters - intensity, spatial or phase density, energy distribution, etc. The program includes a block for the optimization of beam parameters presented in a functional form. Random search method with learning for search correction based on analysis of intermediate results (so-called statistical gradient method) is used for obtaining the global maximum of a function of many variables.

The algorithm was tested during the development of the beams with energy of 100–900 MeV by decelerating the primary proton beam with energy of 1000 MeV in a copper absorber.

Based on the results of measuring the beam profiles of various energies and comparing them with the calculated beam profiles, a conclusion was made about goodness of fit of the algorithm.

EXPERIMENT SETUP

The algorithm PROTON_MK for calculation and optimization high-energy beam transfer lines was tested on the operating synchrocyclotron SC-1000. Channel P3 was selected. The energy of 1000 MeV proton beam was reduced using an absorber and brought to the target through a collimator in the wall.

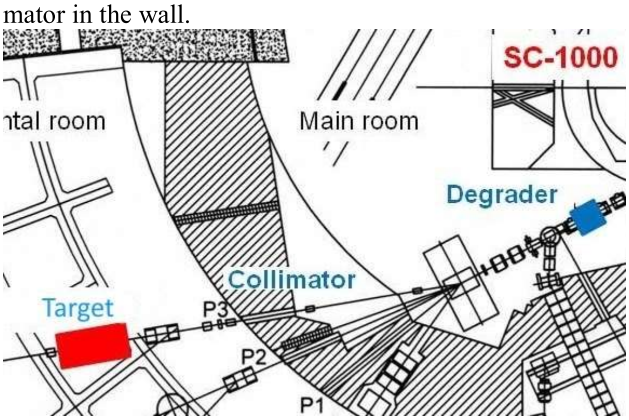


Figure 1: Experiment map.

The target was a scintillation profilometer on which beam profiles were obtained for energies of 200 and 900 MeV. Scintillation profilometer converts the proton flux into a photon flux and measures the profile of the photon beam.

On the other hand, an algorithm was used to calculate beam profiles. The input data for the algorithm were the parameters of the beam after the absorber obtained in GEANT4, as well as the composition of the elements of the P3 channel.

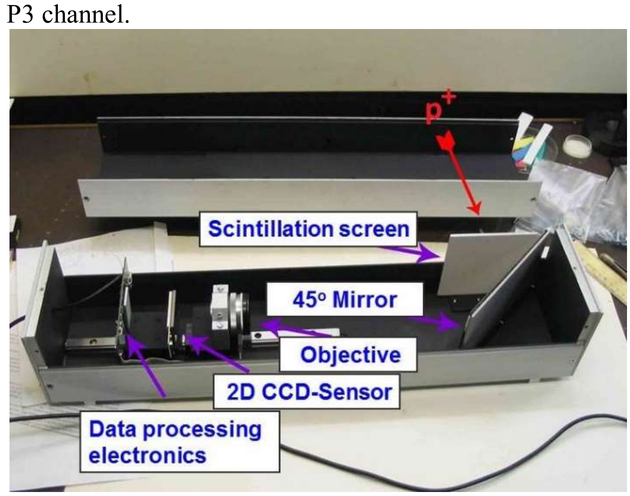


Figure 2: Scintillation profilometer (Target).

THE BEAM TRANSPORT ALONG A CHANNEL

The calculation algorithm PROTON_MK is as follows: the beam parameters after the absorber are calculated using the GEANT4. Then the particle with the chosen initial conditions is traced along the channel. The transport channel consists of standard magnetic elements located in different positions: quadruple lenses, various types of magnets, which provide deflection of the beam in different directions. In a linear approximation, the relationship between the input and output coordinates and velocities in the transport element can be obtained using the transition matrix, which is different for each element [1].

† amerkanov_da@pnpi.nrcki.ru

No	Name	ID	L,cm	p1	p2	p3	p4	Ax,cm	Az,cm
1	Drift	0	13,2					3,5	
2	Drift	0	118,9					9	
3	Lens	3	61,7	1				9	
4	Drift	0	42,63					9	
5	Lens	3	61,7	-1				9	
6	Drift	0	99,1					9	
7	Magnet	6	172,8	-18	0	18	0	9	
8	Drift	0	697,8					9	
9	CollimatorR	10	300					5,5	
10	Drift	0	309,35					9	
11	Lens	3	61,7	1				9	
12	Drift	0	48,7					9	
13	Lens	3	61,7	-1				9	
14	Drift	0	578,3					9	

Figure 3: channel P3 configuration.

VERIFICATION

Using the same channel configuration, the parameters of the beam on the target were calculated using an algorithm. The real beam profiles on the target were also obtained using the scintillation profilometer.

The result of algorithm calculations for 200 MeV proton beam is presented in figures 4,5.

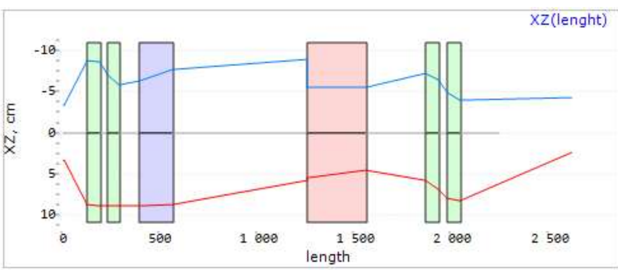


Figure 4: 200 MeV beam envelopes.

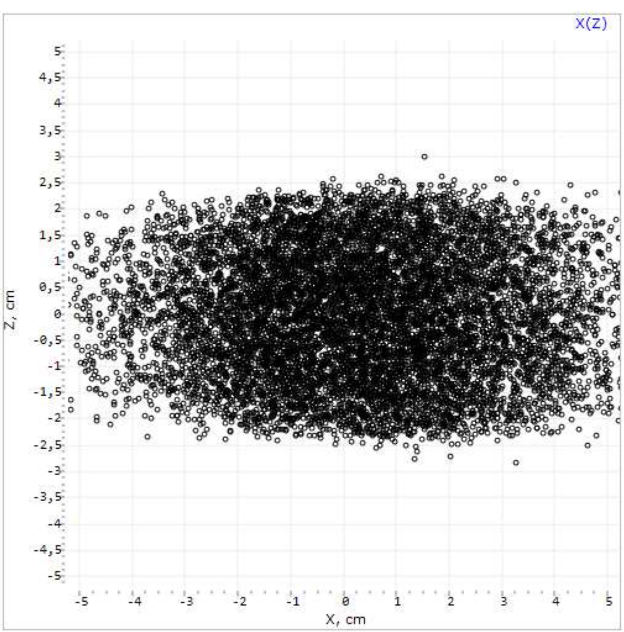


Figure 5: 200 MeV Algorithm result.

The result of profile measurement for real 200 MeV proton beam is presented in figure 6.

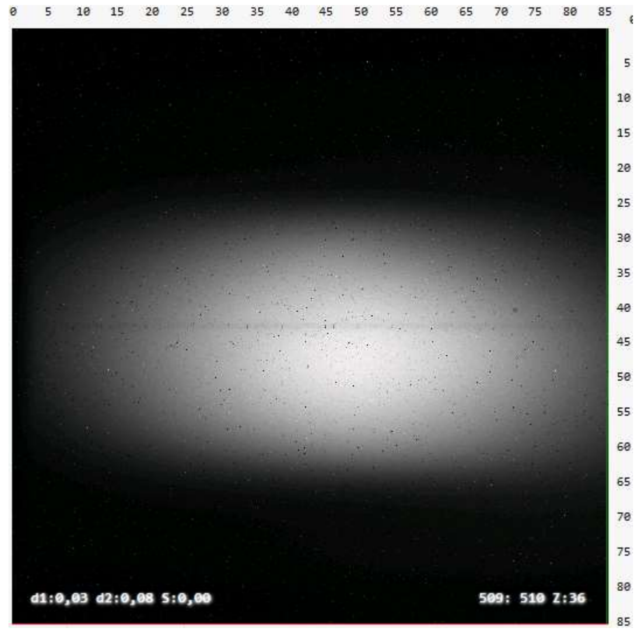


Figure 6: 200 MeV real beam profile.

The result of algorithm calculations for 900 MeV proton beam is presented in figures 7,8.

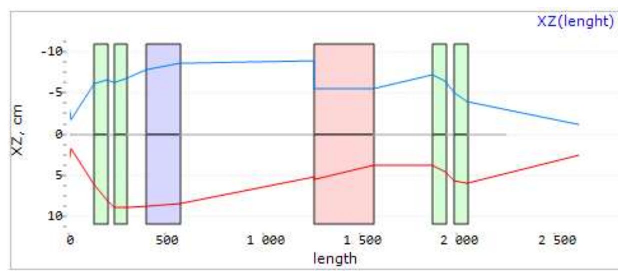


Figure 7: 900 MeV beam envelopes.

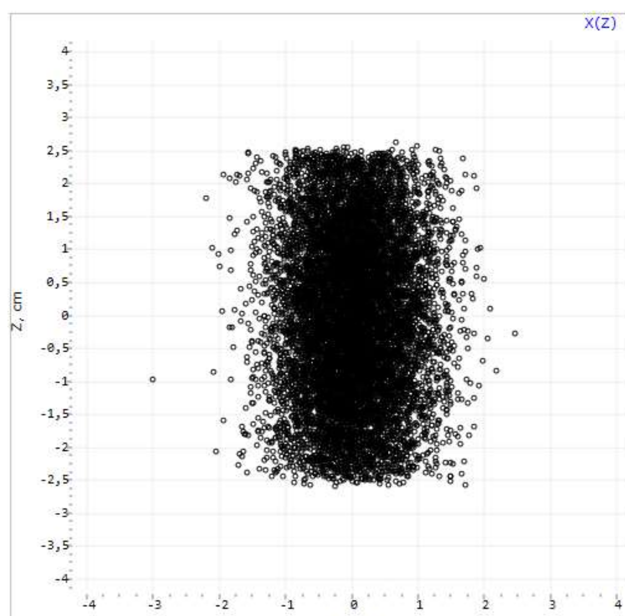


Figure 8: 900 MeV Algorithm result.

The result of profile measurement for real 900 MeV proton beam is presented in figure 9.

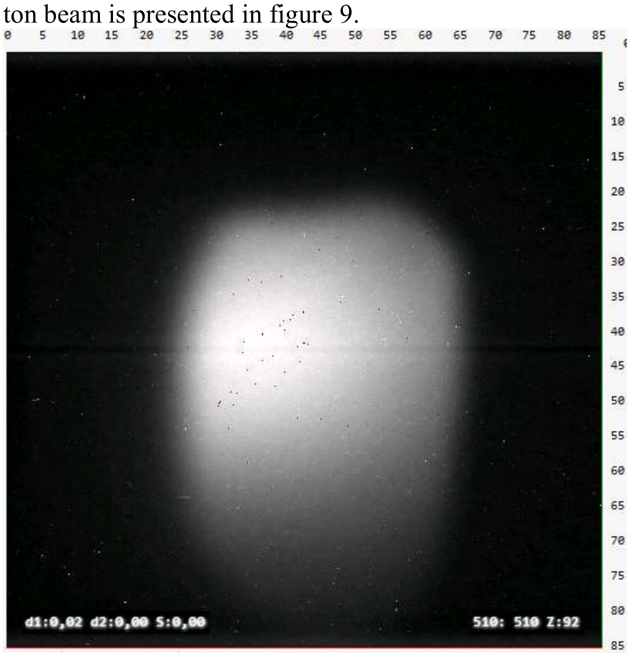


Figure 9: 900 MeV real beam profile.

RESULT

The result of comparing beam sizes for energies of 200 and 900 MeV is presented in Table 1.

Table 1: The result of comparing beam sizes

Beam energy, MeV	Real beam size, cm	Algorithm beam size, cm	Error, %
200	4,6x10	5x11	9
900	4,2x5,2	4x5	5

CONCLUSION

The algorithm PROTON_MK was tested on a real beam with energies of 200 and 900 MeV. The results obtained indicate that this algorithm can be used in the design and configuration of channels for transporting high-energy proton beams. The calculation error is due to the fact that the algorithm takes into account only linear processes for the axial particle, and the quality of the vacuum is not taken into account in the calculation.

REFERENCES

[1] D.A. Amerkanov, E.M. Ivanov, G.A. Ryabov, and V.A. Tonkikh, “CALCULATION AND OPTIMIZATION OF HIGH-ENERGY BEAM TRANSFER LINES BY THE MONTE CARLO METHOD”, 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC2021), Alushta, Russia, Oct. 2021, pp. 262-264. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB16.

STOCHASTIC COOLING IN THE 4th COMISSIONING RUN OF THE NICA COMPLEX

I. V. Gorelyshev†, V. V. Filimonov, S. A. Kostromin[1], K. G. Osipov, A. O. Sidorin[1], Joint Institute for Nuclear Reseasch, Dubna, Russia

[1]also at Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Stochastic cooling system is being developed at the NICA collider to increase the beam density during accumulation and maintain luminosity during heavy ion collisions. The stochastic cooling channel at the Nuclotron is used to test the elements of the collider stochastic cooling system. Before the 4th commissioning run at the Nuclotron, the kicker of the stochastic cooling channel was replaced with a structure based on a ceramic vacuum chamber and a corrugated surrounding. In the course of the 4th NICA commissioning run, the longitudinal degree of freedom of the beam was cooled by the filter method and, for the first time in Russia, by the time-of-flight method with an additional delay of 1 revolution. The paper presents the results of processing experimental data on stochastic cooling of the $^{124}Xe^{54+}$ beam in the Nuclotron during the 4th commissioning run.

INTRODUCTION

The 4th commissioning run of the NICA injection complex was aimed at functional testing, measuring and optimizing the parameters of both the various subsystems of the complex and the conducted xenon beam [1]. Several hours during the run were dedicated to the beam cooling: electron cooling at 3.2 MeV/u inside the Booster and momentum stochastic cooling at 3 GeV/u inside the Nuclotron. The Nuclotron stochastic cooling channel commissioned in 2012 is described in [2]. The update made in the channel before the run was the replacement of the kicker from the ring-slot coupler structure [3] to the structure based on the ceramic vacuum chamber with the corrugated surrounding [4]. The bandwidth of the modified channel was shifted from 2 – 4 GHz and reduced to 1.7 – 2.3 GHz. The main parameters of the setup and the experiment are given in Table 1.

Table 1: Parameters of the experiment

Circumference, m	251.52
Transition gamma	14
Energy, GeV/u	3.05
Ring momentum slip-factor	$5 \cdot 10^{-2}$
Pickup to kicker momentum slip-factor	$5 \cdot 10^{-2}$
Number of ions	$1 \cdot 10^{7}$
Initial momentum spread, $\Delta p/p_0$	$2 \cdot 10^{-4}$
Bandwidth, GHz	1.7 – 2.3
Output power, W	11

† gorelyshev@jinr.ru

COOLING EXPERIMENT

Cooling Methods

The layout of the Nuclotron feedback channel can provide both the filter method and the time-of-flight (TOF) method for momentum stochastic cooling. The channel includes the comb filter consisting of two signal propagation paths. The short path corresponds to the turn in turn beam time of flight between pickup and kicker. The other path is longer by extra time delay of one beam revolution turn. During stochastic cooling by the filter method the 180° hybrid coupler subtracts the long path signal from the short one on the output of the filter. A 90° phase advance is also built into the filter channel.

In the TOF method the only one signal path is used. The main feature of the TOF method is to shift the phase between the pickup measured signal and the kicker correcting signal to minus 90°. Therefore the filter cooling can be described as two TOF methods: the short path TOF subtracted from the long path one. Also TOF method with extra delay of one revolution turn can be obtained from the filter cooling by opening the short signal path. Only these two methods were tested during the experiment. The possibility to switch between the two methods is depicted in figure 1.

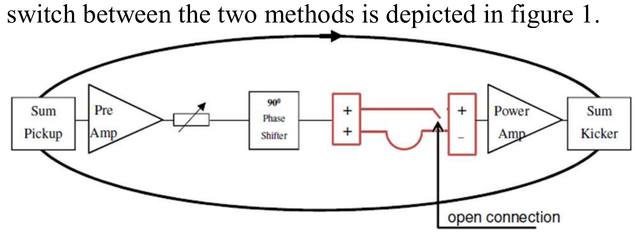


Figure 1: Layout of the time-of-flight cooling method with extra delay of 1 revolution turn based on the filter stochastic cooling channel.

System Adjustment with Open Loop Measurements

To obtain the cooling effect one needs to adjust the delays of the channel with precision order of less than 10 ps. The adjustment procedure begins with open loop measurements. The measurements are performed by the vector network analyser opening the cooling loop. The analyser generates a signal exciting the kicker, propagating via the beam, pickup and the rest of the channel and returning to the analyzer. The frequency measurement points correspond to the shot noise bands` centres ascending as harmonics of the revolution frequency. An example of the open loop measurements is presented in figure 2.

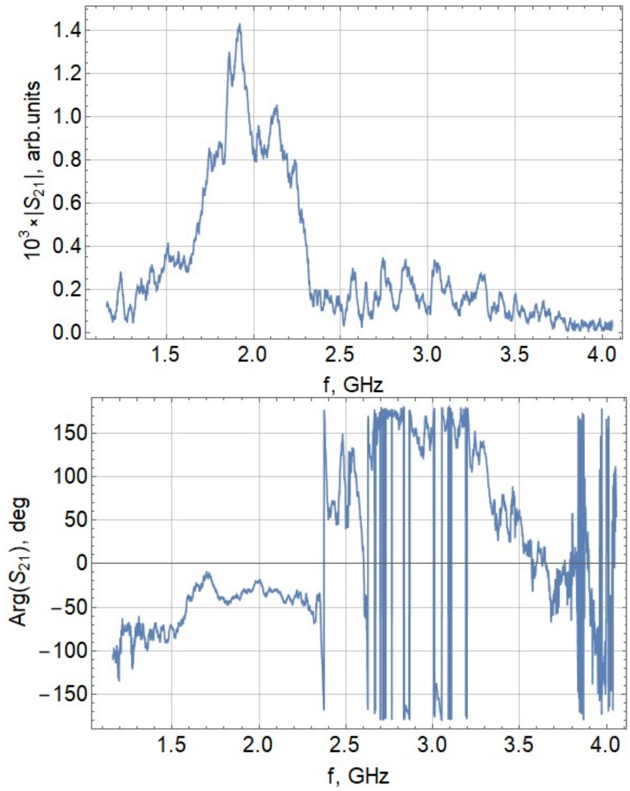


Figure 2: Open loop measurements: amplitude (top) and phase (bottom) frequency response.

From the amplitude response (top of figure 2) the total bandwidth of the channel can be defined. It is seen that the channel bandwidth is 1.7 – 2.3 GHz which was reduced after the replacement of the kicker. The complex values of the response are used to define the cooling force as function of the of the time delay. Cooling force was calculated by the formula defined in [5]. The simplified version of the formula is presented below

$$F(\Delta t) \sim \mathrm{Re}\sum_n OLM(n\omega_0) \times \exp\left(-in\omega_0 \frac{C_{PK}}{C}\frac{\eta_{PK}}{\eta}\Delta t\right)$$

here F – is cooling force, Δt – time delay, OLM – open loop measurements, n – harmonic number, ω_0 – angular revolution frequency, C, C_{PK} – ring circumference and the beam distance from the pickup to the kicker, η, η_{PK} – the corresponding momentum slip-factors. The cooling force calculated for the open loop frequency response given in figure 2 is presented in figure 3.

The exact values of the time delay when cooling is properly adjusted correspond to the zeros of the cooling force with the negative derivative. The curve in figure 3 has four points satisfying this condition. The most effective value is surrounded by the symmetrical wave with the largest amplitude. For the curve in figure 3 the most effective adjustment corresponds to the time delay value of approximately minus 900 ps relative to the current delay setting. Also the time delay point of approximately plus 600 ps is taken for further considerations.

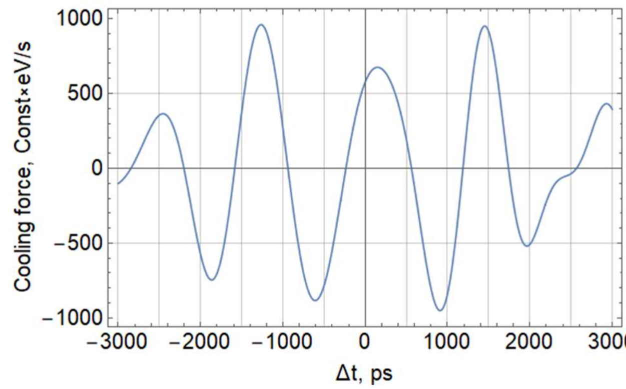


Figure 3: The calculated cooling force based on the open loop frequency response in figure 2 as a function of the channel time delay.

Closed Feedback Loop Effects on the Beam

The effect of closed stochastic cooling loop on the beam circulating in Nuclotron was investigated at 3.05 GeV/u. Spectrum analyser was set to measure spectra at 4,055,899 kHz with frequency span of 500 kHz. This range corresponds to the shot noise band at the 3500th harmonic of the revolution frequency. The data acquisition lasted for almost 15 magnetic field cycles and 177 s. The total duration of each cycle was 12 s with plateau duration of 2 s. A total of 1000 spectra were saved, each in a separate file and all together in the form of a spectrogram. The obtained spectrogram is shown in figure 4. The green stripes correspond to the accelerated beam circulating at the energy of experiment.

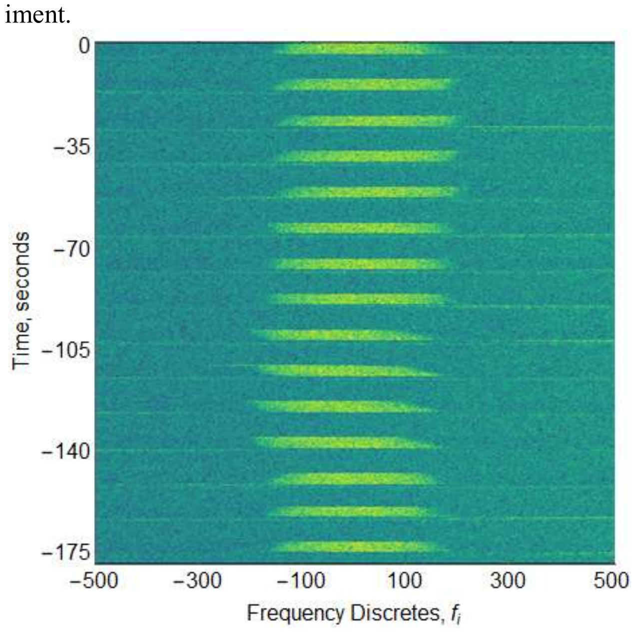


Figure 4: Shot noise power spectrogram at 3500th harmonic of the revolution frequency during 15 magnetic field cycles of Nuclotron operation.

Four regimes of cooling were tested during the data acquisition: for each of the two methods (filter, extra delayed TOF) two points of the system delay were considered. Switches between the regimes were conducted during the descent of the magnetic field. The summary of the effects on the accelerated circulating beam is given in table 2.

Table 2: Cooling loop effects on the beam

Method	Relative delay, ps	Spectrogram stripe # (from bottom)	Effect(s) on spectra
TOF(+1 turn)	-900	1,2,3,15	Spread reduction
Filter	-900	4 – 7	Deceleration, spread reduc.
Filter	600	8 – 10	Slow spread reduction
TOF(+1 turn)	600	11 – 14	Acceleration, spread reduc.

Due to delay inaccuracies slight acceleration or deceleration of the beam was observed in the two regimes. The spread reduction of the spectra was observed in all four regimes. All the spectra corresponding to the plateau of the magnetic field were processed by interpolation to be transformed into a 3D surface. The fastest spread reduction without noticeable acceleration or deceleration was obtained for the regime with the overdelayed TOF method and the relative delay of minus 900 ps. The contour plot for one the 3D surfaces corresponding to this regime is depicted in figure 5. Three curves of the surface are given in figure 6.

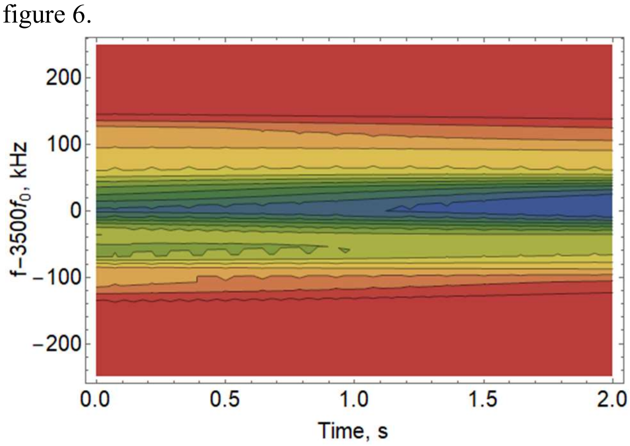


Figure 5: Contour plot of the interpolated spectrogram during one cycle with the fastest stochastic cooling.

Cooling rate estimates

For the regime discussed in the previous section, the raw data from the sequence of 17 spectra were processed to obtain the evolution of the momentum spread. The result is presented in figure 7.

The theoretical value of the cooling time estimated by formulas derived in [6] for the parameters given in table 1 is 8,8 s. The fit of the experimental data gives the value of 16 s. The theoretical and experimental data are well correlated. The difference between theory and the experiment is caused by EMI/EMC impurities. The list of the problems detected during the run is the following:

- Mobile & Wi-Fi interference at the kicker
- Kicker to pickup coupling (at 3.2 GHz)
- Intranetwork coupling (at 4.0 GHz)

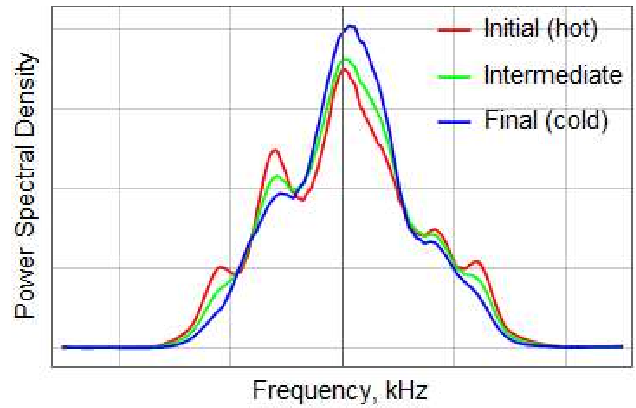


Figure 6: Three curves from the plot of figure 5: start (red), middle (green) and end (blue).

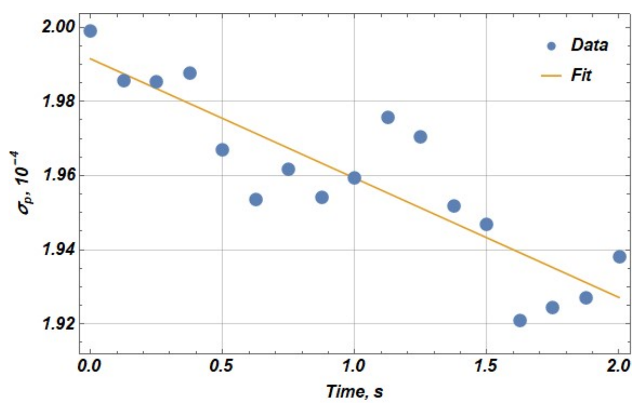


Figure 7: Evolution of the momentum spread during the cycle of stochastic cooling: experimental data (dots) and linear fit (orange line).

CONCLUSION

In the 4th commissioning run of the NICA injection complex the stochastic cooling of coasting xenon beam in the Nuclotron was demonstrated. The causes of additional heating (e.g. EMI/EMC impurities) are defined and to be eliminated.

REFERENCES

[1] E. Syresin *et al.*, “NICA Ion Collider and Plans of Its First Operations”, in *Proc. IPAC'22*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1819-1821. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT001

[2] N. Shurkhno et al., “Stochastic Cooling System at NICA Project”, in *Proc. 23th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC'12)*, St. Petersburg, Russia, Sep. 2012, paper TUPPB004, pp. 313-315, ISBN: 978-3-95450-125-0, http://jacow.org/rupac2012/papers/tuppb004.pdf, 2013

[3] R. Stassen et al., “Recent Developments for the HESR Stochastic Cooling System”, in *Proc. Workshop on Beam Cooling and Related Topics. (COOL'07)*, Bad Kreuznach, Germany, Sep. 2007, paper THAP13, pp. 191-193, ISBN: 978-3-95450-010-9, http://jacow.org/cl07/papers/thap13.pdf

[4] K.G. Osipov, “Design and Optimization of the NICA Longitudinal Stochastic Cooling Pickup/Kicker”, presented at the 27th Russian Particle Acc. Conf. (RuPAC'21), Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, paper TUPSB02, unpublished. https://jacow.org//rupac2021/posters/tupsb02_poster.pdf

[5] N. Shurkhno, “Control of Stochastic Cooling Systems”, in Proc.of the 12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL'19), Novosibirsk, Russia, Sep. 2019, paper TUX03, https://jacow.org/cool2019/talks/tux03_talk.pdf

[6] V. Lebedev and V. Shiltsev, Accelerator physics at the Tevatron collider, Springer (2014)

ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ СГУСТКА ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ В БУСТЕРЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ (БЭП)*

М. В. Тимошенко†, В. М. Борин, В. Л. Дорохов, О. И. Мешков,
ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Россия
М. Д. Яковин, ИАиЭ СО РАН, 630090, г. Новосибирск, Россия

Аннотация

В статье описаны измерения размеров сгустка в электрон-позитронном бустере БЭП коллайдера ВЭПП-2000 при энергии 430 МэВ. Были получены кривые вымирания интенсивности сгустка, происходящего в основном из-за эффекта Тушека, а также рассеяния частиц на остаточном газе, с одновременной регистрацией размеров сгустка. Вертикальный размер пучка в БЭП слишком мал для использования проекционной оптики, поэтому для его измерения использовался двухщелевой интерферометр. Кроме того, затронут вопрос о времени жизни пучка.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе производилось измерение размеров пучка одновременно с его интенсивностью. Под интенсивностью стоит понимать как число частиц N, так и средний ток пучка (или просто ток) $I = eNf_0$, где e – заряд, а f_0 – частота обращения пучка в ускорителе. Пучок при измерениях представлял собой один сгусток.

Измерение производились посредством регистрации оптической части спектра синхротронного излучения пучка (СИ), выводимого из вакуумного объема бустера. Под размером пучка понимается среднеквадратичное отклонение Гауссова распределения частиц в пучке.

Горизонтальный размер пучка регистрировался проекционным методом с помощью ПЗС-камеры; длина пучка измерялась фи-диссектором [1]. Вертикальный размер пучка в БЭП мал для использования проекционной оптики, поскольку разрешающая способность начинает ограничиваться дифракционный пределом (16÷25 мкм для оптического диапазона). Для увеличения разрешения при измерении вертикального размера был использован двухщелевой интерферометр [2] с применением узкополосного (10 нм) фильтра на длину волны 500 нм, щелями с расстоянием между ними 6,2 мм и расстоянием от точки излучения до щелей 2,265 м.

Использование интерферометра на БЭП производилось впервые. Данную систему диагностики планируется отладить и в дальнейшем использовать схожую, но работающую в УФ части спектра СИ, в строящемся ЦКП СКИФ [3] с рекордно малым эмиттансом.

Принципы работы вышеперечисленных систем диагностики пучка детально описаны в [4].

Эксперимент был организован следующим образом – в бустере накапливался пучок значительной интенсивности, после чего накопление останавливалось и пучок вымирал со временем под воздействием эффекта Тушека, а также рассеяния частиц пучка на атомах остаточного газа. Отсюда постобработкой извлекалась информация о времени жизни пучка в бустере.

Теоретические аспекты, рассмотренные в работе, применимы для любых электрон-позитронных циклических машин (накопителей частиц).

БЭП

Бустер БЭП [5] входит в состав электрон-позитронного коллайдерного комплекса ВЭПП-2000 и предназначен для накопления частиц и последующего изменения их энергии до энергии эксперимента на встречных электронном и позитронном пучках в коллайдере ВЭПП-2000 [6].

Параметры бустера представлены в Таблице 1.

Таблица 1: Проектные параметры бустера

Величина	**Параметр**
Диапазон энергий пучка, E	160÷1000 МэВ
Периметр, П	22,35 м
Частота обращения пучка, f_0	13,415 МГц
Радиус поворотного магнита, r_0	128 см
Гармоника ВЧ-резонатора, h	13
Бетатронные частоты, ν_x, ν_z	3,4; 2,4
Коэф. уплотнения орбиты, α_p	0,059

В данной работе измерения проводились при равновесной энергии пучка $E = 430$ МэВ. Параметры, обусловленные квантовыми флуктуациями СИ (или – радиационные), будут обозначаться индексом $_0$:

- Относительный энергетический разброс, $\frac{\sigma_{E_0}}{E} = 3{,}2 \cdot 10^{-4}$
- Эмиттанс, $\varepsilon_0 = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ см · радиан
- Длина пучка, $\sigma_{s_0} = 1{,}67$ см

Для горизонтального и вертикального движения пучка для реальной циклической машины присутствует связь бетатронных колебаний, которая определяет распределение горизонтального и вертикального эмиттансов, а значит и размеров пучка – в данной работе и вычисляется экспериментально.

РОСТ РАЗМЕРОВ ПУЧКА С ТОКОМ

Указанные выше параметры приведены для «нулевого тока» пучка, при увеличении интенсивности пучка в игру вступают несколько эффектов, приводящих к росту его размеров.

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-12-20025
† M.V.Timoshenko@inp.nsk.su

Многократное внутрисгустковое рассеяние IBS

Частицы внутри пучка испытывают кулоновское рассеяние друг на друге, что приводит, с одной стороны, при рассеянии на малые углы, к росту энергетического разброса и эмиттанса пучка, с другой стороны, при рассеянии на большие углы в продольном направлении – к выходу частиц из сепарастрисы продольного движения, то есть к их потере из пучка (или гибели).

В данном разделе рассмотрен эффект IBS (intra-beam scattering) и его влияние на размеры пучка. Второй эффект частично определяет время жизни пучка и рассмотрен в следующем разделе.

Согласно [7], энергетический разброс зависит от интенсивности пучка следующим образом:

$$\sigma_E^2 = \frac{N r_0^2 p_0^2 c^3 \tau_E}{32\pi\gamma^3 \sigma_x \sigma_z \sigma_{x'} \sigma_s} f(\xi) + \sigma_{E_0}^2, \tag{1}$$

а эмиттанс, имея схожую природу роста при IBS, пропорционален квадрату энергетического разброса:

$$\varepsilon = U\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2, \quad U = \frac{\varepsilon_0}{\left(\frac{\sigma_E}{E}\right)_0^2}, \tag{2}$$

При этом сами поперечные размеры $\sigma_{z,x,x'z'} \sim \frac{\sigma_E}{E}$, в частности:

$$\begin{gathered} \sigma_x = \sqrt{U_x \beta_x + D_x^2} \cdot \frac{\sigma_E}{E}, \qquad U_x = U \cdot \frac{1}{1+k} \\ \sigma_z = \sqrt{U_z \beta_z} \cdot \frac{\sigma_E}{E}, \qquad U_z = U \cdot \frac{k}{1+k} \end{gathered} \tag{3}$$

σ_{E_0} – радиационный энергетический разброс, k – коэффициент связи бетатронных колебаний. Нормируя величины на который ($\widehat{\sigma_E} = \sigma_E / \sigma_{E_0}$), получим формулу:

$$\widehat{\sigma}_s(\widehat{\sigma}_E^5 - \widehat{\sigma}_E^3) = N \times C \tag{4}$$

C – константа, зависящая от магнитной структуры накопителя, энергетического акцептанса и пр. Продольный же размер σ_s вынесен отдельно, поскольку вклад в удлинение пучка дает еще и другой эффект.

Импедансное удлинение пучка

В [8] достаточно описан эффект искажения потенциальной ямы продольного движения пучка, вследствие которого синхротронная частота приобретает когерентный сдвиг:

$$\begin{gathered} \Omega_s^2 = \Omega_{s\,0}^2 \left(1 + I \cdot \tilde{A} \cdot \left(\frac{\sigma_{s_0}}{\sigma_s}\right)^3 Im\left(\frac{Z}{n}\right)_{\text{эфф}}\right), \\ \tilde{A} = \frac{(2\pi R)^3}{3h\sigma_{s_0}^3 U_0 \cos\phi_s} \end{gathered} \tag{5}$$

Здесь $Im\left(\frac{Z}{n}\right)_{\text{эфф}}$ – является мнимой частью импеданса вакуумного объема бустера, U_0 – напряжение ВЧ-резонатора, ϕ_s – равновесная фаза продольного движения, R – средний радиус ускорителя. Длина пучка рассчитывается по формуле $\sigma_s = \frac{c\alpha_p}{\Omega_s} \cdot \frac{\sigma_E}{E}$, откуда вытекает нетривиальность зависимости длины пучка от его тока:

$$\widehat{\sigma}_s{}^3 - \widehat{\sigma}_s \widehat{\sigma}_E^2 = N \times A, \quad A = \tilde{A} \cdot Im\left(\frac{Z}{n}\right)_{\text{эфф}} \tag{6}$$

Видно, что рост энергетического разброса и импедансное удлинение пучка, представляют из себя самосогласованную задачу, не имеющего аналитического решения.

$\hat{}$ – означает нормировку на радиационные величины.

Измерения

На рисунках ниже представлена токовая зависимость размеров в двух сериях измерений при разных конфигурациях оптики, обеспечивающих два различных коэффициента связи (k_1 и k_2). k_1 – минимально возможная полученная связь, k_2 – немного увеличенная связь посредством подстройки скью-квадруполей.

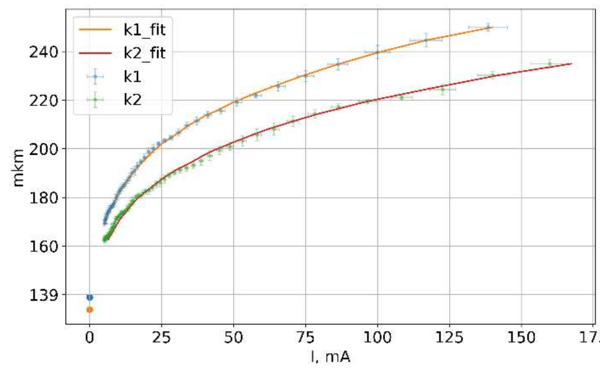


Рисунок 1: Горизонтальный размер.

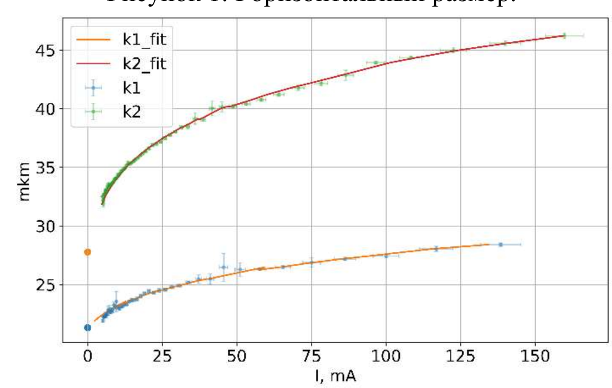


Рисунок 2: Вертикальный размер.

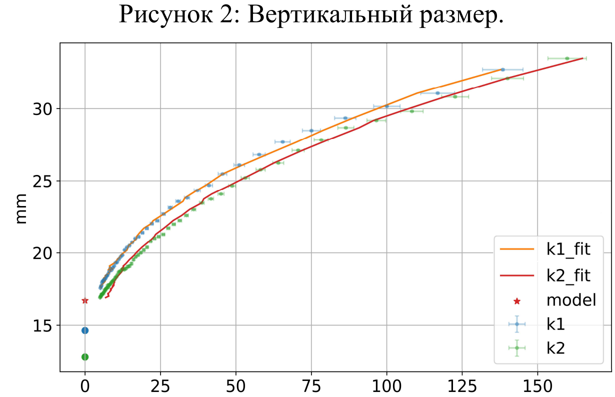


Рисунок 3: Продольный размер.

Экспериментальные данные аппроксимировались модельными функциями: (4) для поперечных размеров и (6) для продольного. При подстановке в модельные функции вместо энергетического разброса использовались данные измерений поперечных размеров в силу их пропорциональности.

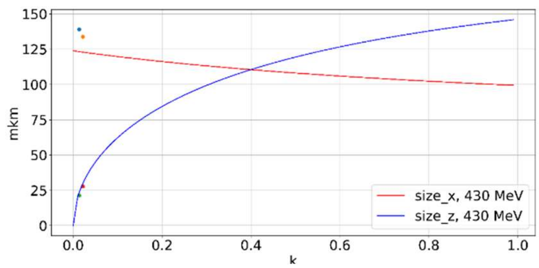


Рисунок 4. Проектные зависимости размеров от коэф. связи бетатронных колебаний.

Из результатов аппроксимации σ_{x_0} и σ_{z_0}, вычисляются коэффициенты связи согласно расчетам проектной оптики бустера по формулам (3): $k_1 = 1{,}3\%$, $k_2 = 2{,}1\%$. А также значение радиационной длины пучка и эффективного импеданса (Таблица 2).

Таблица 2: Результаты аппроксимации удлинения

k	$\boldsymbol{\sigma_{s_0}}$	$\boldsymbol{Im\left(\frac{Z}{n}\right)_{эфф}}$
1.3%	14,8 мм	25,6 мОм
2.1%	12,5 мм	23,3 мОм
Проектная величина	16,7 мм	–

ВРЕМЯ ЖИЗНИ ПУЧКА

В накопителе электронов и позитронов определяющими факторами времени жизни пучка являются рассеяние частиц на остаточном газе и эффект Тушека. Оба фактора зависят от интенсивности пучка.

Время жизни определяется как обратный декремент – нормированная на интенсивность скорость выбывания частиц из пучка, со знаком минус. Декременты от каждого из факторов складываются:

$$\tau^{-1} = -\frac{\dot{N}}{N} = -\frac{\dot{I}}{I} = \tau_{Touschek}^{-1} + \tau_{desorption}^{-1} + \cdots \qquad (7)$$

Десорбция

При воздействии СИ пучка происходит фотостимулированная десорбция газа с внутренней поверхности стенок вакуумного объема. При этом эффект увеличивается с ростом числа частиц в пучке, увеличивая, соответственно, и рассеяние, способствующее гибель частиц.

Подробно механизмы потери частиц из пучка описаны в [9], мы же воспользовались тем фактом, что скорость рассеяния пропорциональна давлению газа, а остальные параметры, влияющие на нее, являются независящими от тока пучка и определяются энергетическим акцептансом, оптической структурой, составом газа и коэффициентом десорбции газа с поверхности:

$$\tau_{desorption}^{-1} = a_{desorption} \cdot P(I), \qquad (8)$$

где $P(I)$ – усредненное давление остаточного газа в вакуумном объеме. На Рис. 5 изображено среднее с двух датчиков давление в БЭП.

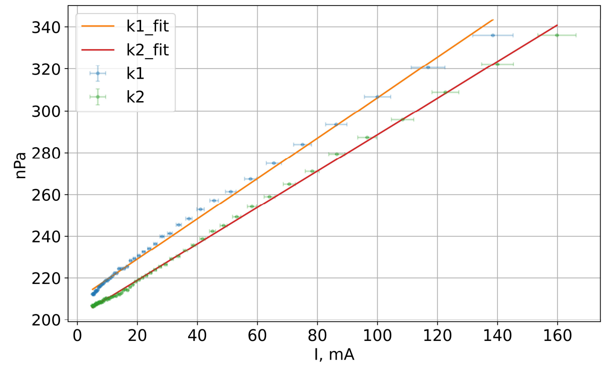


Рисунок 5. Зависимость давления газа от тока пучка.

С хорошей точностью зависимость близка к линейной.

Тушек-эффект

Явление детально рассмотрено в [10], откуда возьмем расчетную формулу для плоского ультрарелятивистского пучка (малые импульсы в системе отсчета центра масс пучка):

$$\tau_{Touschek}^{-1} = \left\langle \frac{\beta_x N r_{\text{particle}}^2 c}{8\pi\gamma^3 \widetilde{\sigma_x} \sigma_{x\beta} \sigma_{z\beta} \sigma_s \delta_m^2} C(\epsilon_m) \right\rangle, \qquad (9)$$

здесь скобки означают усреднение по азимуту кольца, $\sigma_{x\beta} = \sqrt{U_x\beta_x} \cdot \sigma_E$, $\sigma_{z\beta} = \sqrt{U_z\beta_z} \cdot \sigma_E$, $\widetilde{\sigma_x} = \sqrt{U_x\beta_x + (\widetilde{D}^2 + D^2)} \cdot \sigma_E$, $\widetilde{D} = \alpha_x D + \beta_x D'$, D – горизонтальная дисперсия (вертикальную дисперсию считаем равной нулю), δ_m – ширина сепаратрисы продольного движения

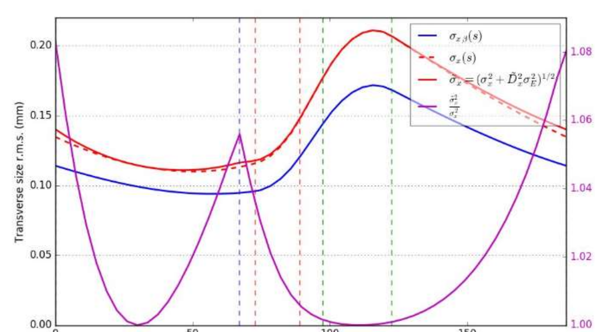


Рисунок 6. Зависимость $\sigma_{x\beta}$, σ_x и $\widetilde{\sigma_x}$ на одном из 12-ти суперпериодов структуры БЭП.

Обычно декремент рассчитывается численным моделированием в специализированном программном обеспечении, однако в данном рассмотрении предприняты попытки упростить модель и разделить выражение на параметры на зависящие от интенсивности пучка N (или I) или от азимута кольца s в частном случае для бустера БЭП.

Разделение переменных В выражении (9) параметры подразделяются на локальные по азимуту и не зависящие от интенсивности пучка (бета-функции, дисперсия) и интегральные по всему кольцу и зависящие от нее (эмиттанс, энергетический разброс, длина пучка):

$$\tau^{-1}_{Touschek} = C_1 \left\langle \frac{\beta_x \cdot C(\epsilon_m)}{\widetilde{\sigma_x}\sigma_{x\beta}\sigma_{z\beta}\sigma_s} \right\rangle \frac{1}{\sigma_s} = \\ = C_1 N \left\langle \frac{\beta_x \cdot C(\epsilon_m)}{\sqrt{U_x\beta_x + D^2 + \widetilde{D}^2}\sqrt{U_x\beta_x}\sqrt{U_z\beta_z}} \right\rangle \frac{1}{\sigma_E^3 \cdot \sigma_s} \qquad (10)$$

Функция $C(\epsilon_m)$ сложного вида описана в [10], где

$$\epsilon_m = \frac{\delta_m^2 \beta_x^2 \sigma_x^2}{\gamma^2 \sigma_{x\beta}^2 \widetilde{\sigma_x}^2} \sim f_1(s) \cdot \frac{1}{\sigma_E^2} \qquad (11)$$

На Рис. 7 представлена азимутальная зависимость усредняемого выражения при различных σ_E, варьируемых в диапазоне $1\sigma_{E_0} \div 2\sigma_{E_0}$ (экспериментальные данные поперечных размеров показывают, что этого более, чем достаточно).

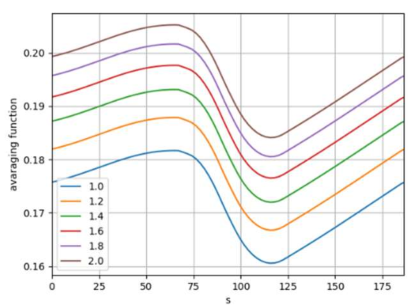


Рисунок 7. Азимутальная зависимость выражения под усреднением.

Результат усреднения при различных значениях $\sigma_E \backslash \sigma_{E_0}$ изображен на графике Рис. 8.

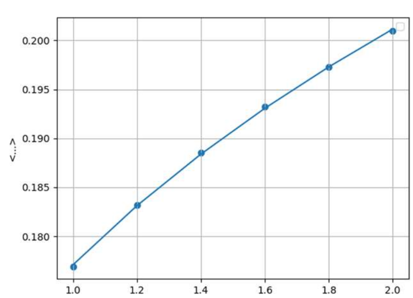


Рисунок 8. Результат усреднения.

Так эмпирическим путем получили следующую зависимость:

$$\left\langle \frac{\beta_x \cdot C(\epsilon_m)}{\sqrt{U_x\beta_x + D^2 + \widetilde{D}^2}\sqrt{U_x\beta_x}\sqrt{U_z\beta_z}} \right\rangle = C_2 \cdot G(\sigma_E), \qquad (12)$$

$G(\sigma_E) = {\sigma_E}^{\alpha} \sim {\sigma_x}^{\alpha} \sim {\sigma_z}^{\alpha}$, и степень $\alpha = 0.184$.

Фактор объема пучка Вернемся к выражению (10), а именно к:

$$\frac{1}{\sigma_E^3 \cdot \sigma_s} = \frac{C_3}{V(s_0, N) \cdot \sigma_x(s_0, N)}, \qquad (13)$$

$$C_3 = \sqrt{U_x\beta_x + D^2} \cdot \sqrt{U_z\beta_z} \cdot \sqrt{U_z\beta_z + D^2}\,\Big|_{s=s_0}$$

где $V(s_0, N)$ и $\sigma_x(s_0, N)$ – объем и горизонтальный размер пучка в точке азимута, где производилось измерения размеров пучка. Полученное выражение в знаменателе концептуально практически соответствует произведению в знаменателе усредняемого выражения формулы (10).

В итоге исходная формула (9) принимает вид:

$$\tau^{-1}_{Touschek} = b_{Touschek} \frac{N \cdot \sigma^{\alpha}_{x,z}(s_0, N)}{V(s_0, N) \cdot \sigma_x(s_0, N)} \qquad (14)$$

где $b_{Touschek} = C_1 C_2 C_3 / \sigma^{\alpha}_{x,z_0}$, $\alpha = 0{,}184$. Индексы x, z означают, что можно подставлять либо горизонтальный размер, либо вертикальный.

Измерения времени жизни

Информация о декременте извлекалась из кривых вымирания пучка путем численного дифференцирования данных тока, регистрируемого калиброванным пикапом, и нормировалась на него.

Аппроксимация данных производилась суммой модельных функций (8) и (14) с подстановкой измеренных величин (размеры и давление).

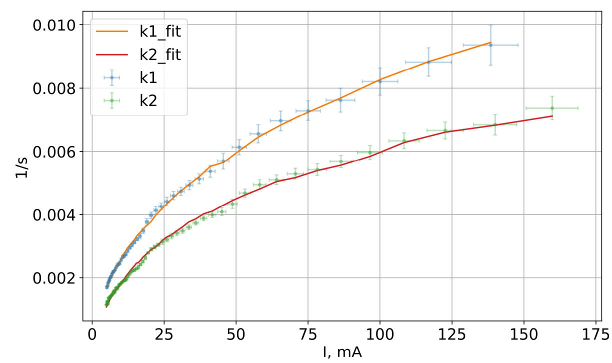


Рисунок 9. Результат усреднения в зависимости от энергетического разброса.

Полученные в результате аппроксимации параметрам $b_{Touschek}$ и $a_{desorption}$ дают представление о соотношении вклада факторов во время жизни пучка по-отдельности. Рис. 10 демонстрирует доминирование эффекта Тушека над десорбцией (рассеянием частиц пучка на остаточном газе).

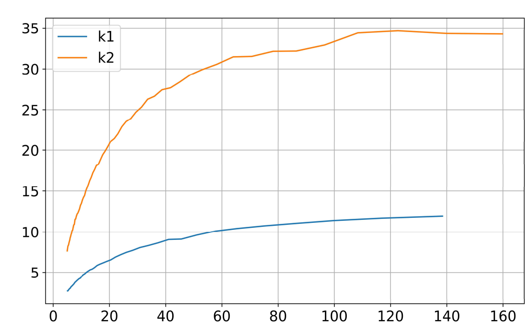


Рисунок 10. Отношение эффекта Тушека к десорбции.

На Рис. 11 показано время жизни пучка τ в зависимости от тока.

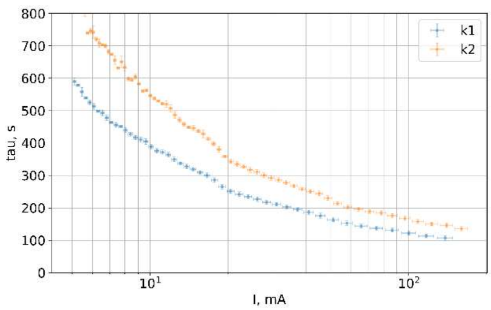


Рисунок 11. Время жизни пучка от тока.

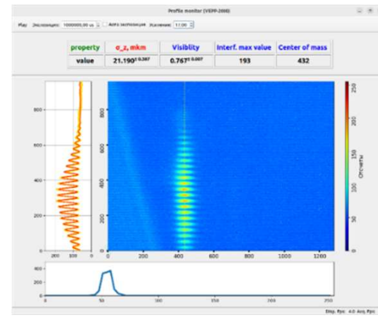


Рисунок 13. Вид окна ПО для интерферометра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждение результатов

В Таблице 3 приведены отклонения значений от проектных (согласно модели магнитной магнитной структуры БЭП).

Таблица 3: Отклонение от проектных значений

Величина	k_1	k_2
σ_{s_0}	11%	25%
σ_{x,z_0}	11%	8%

Согласно выражениям (3), отношение горизонтального размера к вертикальному (σ_x/σ_z) в произвольной точке азимута не должно зависеть от энергетического разброса, а, следовательно, и от тока пучка. В экспериментальных данных (Рис. 12) вариации составляют 15% и 4% для k_1 и k_2 соответственно.

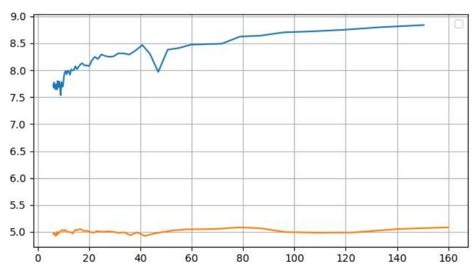


Рисунок 12. Зависимость σ_x/σ_z от тока.

Вероятно, имелось значительное отличие реальной оптики бустера от проектной, а также не могут исключаться ошибки в методиках измерений величин (тока пучка и размеров). Необходимо тщательное изучение оптики и сравнение с численным моделированием.

Выводы

- Различными системами диагностики измерены размеры пучка в бустере БЭП в зависимости от его интенсивности.
- На полученных данных опробована самосогласованная модель для IBS и импедансного удлинения, а также модель для времени жизни пучка, определяемого десорбцией и эффектом Тушека.
- На БЭП установлен, отъюстирован и опробован двухщелевой интерферометр, доработано программное обеспечение, осуществляющее анализ интерференционной картины (Рис. 13)

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда правительства Новосибирской области Российской Федерации (Грант РНФ № 22-12-20025 «Развитие методов повышения яркости излучения и апробация диагностик электронного пучка источника СИ 4-го поколения СКИФ»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] E. I. Zinin and O. I. Meshkov, “Optical dissector for longitudinal beam profile measurement”, Journal of Instrumentation, vol. 10, p. 10024, Oct. 2015. doi:10.1088/1748-0221/10/10/P10024

[2] В. Л. Дорохов, “РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ В ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ”, диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, Россия, Новосибирск, 2021 г.

[3] Е.Б. Левичев и др. “Проект создания синхротронного источника поколения 4+ ЦКП СКИФ в р.п. Кольцово Новосибирской области: общая информация и статус реализации” // В сборнике Технологическая СКИФ. Том 1. Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс. 2022. ISSBN 9785906376411.

[4] В. В. Смалюк, “Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях”, Параллель, Россия, Новосибирск, 2009 г.

[5] D. Shwartz et al., “Booster of electrons and positrons (BEP) upgrade to 1 GeV”, in *Proc. 5th International Particle Accelerator Conf. (IPAC’14)*, Dresden, Germany, 2018, pp. 102-104. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRO018

[6] D. Shwartz et al. “VEPP-2000 collider operation in full energy range with new injector”, *in Proc. 26th Russian Particle Accelerator Conf.* (*RuPAC’18*), Protvino, Russia, 2018, pp. 7-11. doi:10.18429/JACoW-RUPAC2018-MOXMH02

[7] J. Le Duff, “Single and multiple Touschek effects”, CERN 95-06 v2, CAS – CERN Accelerator School: 5 th Advanced Accelerator Physics Course, Rhodes, Greece, 20 Sep – 1 Oct 1993.

[8] B. Zotter, “The Effective Coupling Impedance for Bunched Beam Instabilities”, CERN Report, CERN/ISR-TH/78-16, Geneva, Switzerland, July 1978.

[9] H. Wiedemann. “11.8 Beam Life Time”, in *Particle Accelerator physics*, 4th Ed. 2019, pp. 385-399.

[10] A. Piwinski, “The Touschek effect in strong focusing storage ring”, Preprint DESY 98-179, Germany 1998.

МЕДЛЕННЫЙ ВЫВОД ПУЧКА ИЗ НУКЛОТРОНА: ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В.А. Лебедев, В.А. Михайлов, В.Л. Смирнов*, М.М. Шандов
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Аннотация

Нуклотрон – базовый синхротронный ускоритель ЛФВЭ ОИЯИ, успешно функционирующий в составе комплекса NICA. Тяжелые ионы выводятся для использования в экспериментах по физике высоких энергий с помощью системы медленного вывода пучка на нелинейном резонансе третьего порядка. Расчетные и экспериментальные исследования проводятся с целью повышения эффективности вывода пучка и его характеристик. В работе приведены результаты численного моделирования медленного вывода пучка из Нуклотрона с целью верификации измеренных данных, выбора оптимальных параметров и будущих модернизаций ускорительной установки.

ВВЕДЕНИЕ

Нуклотрон имеет периметр 251.52 м и ускоряет ионы до энергии, соответствующей магнитной жесткости 40 Тл·м. Вывод пучка осуществляется с использованием резонанса *3Qx=22* [1, 2]. Система вывода пучка состоит из четырех квадрупольных магнитов, используемых для сдвига бетатронной частоты пучка в область действия резонанса, и двух пар секступольных магнитов, формирующих фазовые траектории частиц выводимого пучка. Обратная связь по току выведенного пучка, контролирующая темп изменения полей квадрупольных магнитов, и высокочастотное поле кикера, возбуждающее бетатронное движение частиц, используются для улучшения равномерности вывода пучка.

Пучок выводится из Нуклотрона с помощью электростатического септума (ЭСС) и двух сверхпроводящих магнитов Ламбертсона. Требования к длительности вывода пучка составляют от сотен миллисекунд до нескольких десятков секунд.

Нуклотрон введен в эксплуатацию в 1992 г. и многие годы успешно функционирует с пучками различных типов ионов. Однако обеспечение медленного вывода пучка с высокой проектной эффективностью (80-90 %) является сложной задачей. Цель численных расчетов состоит в том, чтобы проанализировать процесс вывода пучка с учетом различных рассогласований системы, определить причины потерь частиц и сформулировать возможные способы экспериментального улучшения характеристик выведенного пучка.

Основной режим работы предполагает первоначальное уменьшение отстройки бетатронной частоты частиц от резонанса за счет вариации токов в основных структурных квадруполях (Рис. 1, участок 1-2). Последующее приближение рабочей точки к резонансу осуществляется за счет использования квадруполей системы вывода (Рис. 1, участок 2-3). Перед выводом пучок адиабатически разгруппировывается вследствие выключения ускоряющего напряжения.

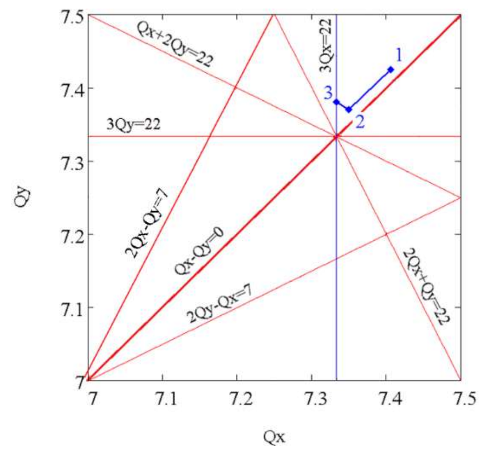


Рис. 1. Движение рабочей точки Нуклотрона на частотной диаграмме. Пучок инжектируется в точке 1. На участке 1-2 происходит приближение к резонансу за счет основных квадруполей кольца. Смещение рабочей точки на резонанс (2-3) осуществляется квадруполями выводной системы.

В сеансе пуско-наладочных работ инжекционного комплекса NICA в 2023 г. при ускорении ионов $^{128}Xe^{54+}$ с магнитной жесткостью 36 Тл·м эффективность медленного вывода не превышала 40 %. Наиболее вероятными причинами, которые исследовались численными методами, являются искажение орбиты, ограничивающее горизонтальный аксептанс, и рассогласование между направлением пучка и ориентацией ножа ЭСС. Часть расчетов посвящена изучению влияния на выведенный пучок высокочастотного электромагнитного поля кикера, использование которого значительно улучшало равномерность выводимого пучка в измерениях.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Численный анализ проводился в два этапа. В начале разрабатывались расчетные программы, описывающие процесс медленного вывода пучка для экспериментальных режимов работы Нуклотрона. Затем последовательно вносились искажения системы, в достаточной

*vsmirnov@jinr.ru

степени характеризующие экспериментальные данные, и выяснялись причинно-следственные связи, приводящие к потерям пучка.

В расчетах использовался следующий численный алгоритм. В программе, предназначенной для разработки и оптимизации оптических структур ускорителей (в данном случае использовалась OptiMX [3]), строилась оптическая модель синхротрона, включающая все элементы системы. Из построенной модели экспортировались бетатронные функции и набеги бетатронных фаз, на основании которых вычислялись матрицы перехода между элементами [4] вывода: ЭСС, секступольными магнитами и кикером. Действие секступольного магнита представляется в виде «удара», приводящего к изменению горизонтального угла.

Действие электрического поля кикера генерировалось с применением метода Finite Impulse Response (FIR) [5, 6]. Начальные положения и углы частиц генерировались с Гауссовым распределением, соответствующим значениям бета- и альфа-функций начальной точки. Трассировка производилась для каждой частицы путем последовательного перемножения матриц перехода и ударов от секступолей и кикера. В расчетах учитывался хроматизм горизонтальных бетатронных колебаний, и анализировалась лишь динамика ионов в горизонтальном направлении. Вычислительный алгоритм реализован с использованием языка C++. Потери частиц в выводной системе учитывались лишь на ноже ЭСС. Для того чтобы реалистично оценивать эффективность проводки через ЭСС изначально был вычислен его геометрический аксептанс с помощью трассировки пучка частиц. Нож ЭСС расположен на расстоянии 20 мм от равновесной орбиты. Толщина ножа 0.1 мм.

Исследовалась штатная схема работы системы вывода, которая предусматривает включенные секступольные магниты с постоянным во времени полем, а уменьшение и контроль размеров области неустойчивости осуществляется за счет смещение их бетатронных частот к резонансу с помощью квадруполей системы вывода. Начальная отстройка от резонанса, с которой начинались расчеты, была 0.01. Отстройка уменьшалась до нуля за время циркуляции пучка (до 4 секунд, ~$5 \cdot 10^6$ оборотов).

Четыре секступольных магнита на Нуклотроне подключены попарно (Ф- и Д-семейства). Суперпозицию секступольных магнитов можно представить в виде общего виртуального секступольного магнита [7], сила и фаза которого вычисляются как:

$$S_{virt}^2 = \left[\sum_{n=1}^{Ns} S_n \sin(3\mu_n)\right]^2 + \left[\sum_{n=1}^{Ns} S_n \cos(3\mu_n)\right]^2$$
$$\mu_{virt} = \frac{1}{3}\operatorname{atan}\left[\frac{\sum_{n=1}^{Ns} S_n \sin(3\mu_n)}{\sum_{n=1}^{Ns} S_n \cos(3\mu_n)}\right] \qquad (1)$$

Расчеты по (1) показывают, что одной пары секступолей достаточно, чтобы направить вершины искаженных фазовых эллипсов в сторону ЭСС. Ориентация фазовых портретов пучка на азимуте входа в выводную систему определяется параметрами Твисса на данном азимуте. Варьирование отношений полей секступольных магнитов переориентирует фазовые траектории, в целом, не изменяя наклона эмиттансов. Пучок в Нуклотроне на входе в ЭСС сходящийся, поэтому среднее значение угла частиц в пучке, попавшем в апертуру ЭСС, отрицательное (Рис. 2). С помощью различных комбинаций величин полей в секступолях возможно варьировать угол влета пучка в ЭСС в диапазоне ±0.5 мрад.

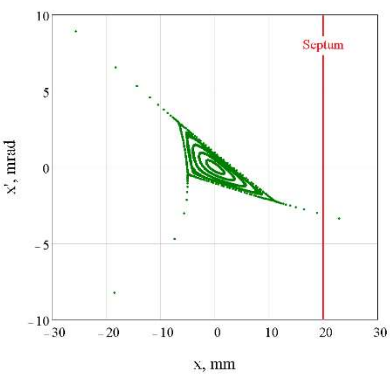


Рис. 2. Фазовые портреты пучка на азимуте входа в выводную систему.

Электростатический септум повернут в горизонтальной плоскости в сторону оси прямолинейного промежутка на ~3.3 мрад, что увеличивает эффективность вывода (Рис. 3).

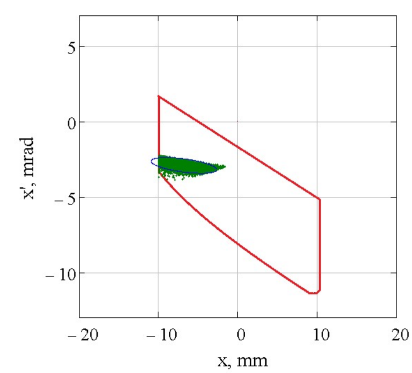


Рис. 3. Портрет пучка в фазовом пространстве на входе в электростатический дефлектор на фоне его аксептанса; поле секступолей равно 0.13 кГ/см^2.

После определения оптимального отношения сил секступольных магнитов (направления вектора их суперпозиции) производится оценка влияния абсолютной величины их комбинации (модуля вектора суперпозиции). Большая величина силы резонанса ведет к увеличению градиента шага орбиты частицы, а, следовательно, к уменьшению потерь частиц на ноже ЭСС. Одновременно растет эмиттанс выводимого пучка и его горизонтальный размер, который при больших возмущающих силах превышает апертуру ЭСС, что приводит к снижению эффективности вывода пучка вследствие потерь ионов на электроде (Рис. 4).

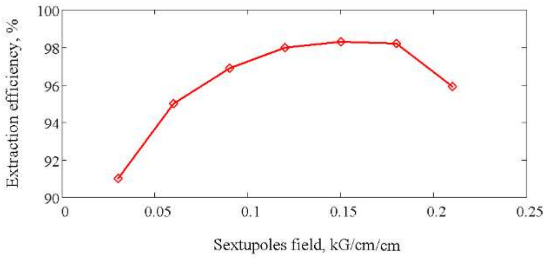


Рис. 4. Эффективность проводки пучка через электростатический дефлектор в зависимости от величины поля секступольных магнитов. Потери частиц при больших полях обусловлены попаданием их на внешнюю часть апертуры.

При начальном среднеквадратичном поперечном размере пучка ±2.5 мм эффективность вывода пучка снижается с 97 до 80 % при уменьшении расстояния между ножом ЭСС и центром масс пучка с 20 до 10 мм. Рост потерь частиц наблюдается на ноже ЭСС вследствие уменьшения шага роста амплитуды за оборот при амплитуде равной расстоянию до ножа ЭСС.

В Нуклотроне раскачка электрическим полем кикера используется для увеличения равномерности вывода пучка. Кикер представляет собой две вертикальные пластины с зазором 12 см и протяженностью 60 см. Напряжение на пластинах определяется мощностью усилителя равной 800 Вт. Использование повышающего трансформатора позволяет получить разность потенциалов до 1200 В. Диапазон частот работы кикера до 100 МГц.

Аналитические оценки [8] для пучков с максимальной магнитной жесткостью 36 Тл·м при работе кикера с максимальным напряжением и равномерной спектральной мощностью в полосе частот много больше частоты их обращения рост эмиттанса и размера пучка равны:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \approx 0.5\frac{\pi \cdot mm \cdot mrad}{s},$$
$$\frac{d\sigma}{dt} \approx 0.3\,\frac{mm}{s}\left(for\, \varepsilon = 3\pi \cdot mm \cdot mrad \right).$$

Таким образом, влияние кикера может привести к раскачке амплитуд ионов, достигающих апертуры ЭС, лишь за 15-20 секунд.

Численный анализ динамики пучка показывает, что не наблюдается положительного эффекта на равномерность вывода пучка от использования поля кикера в случае, когда обратная связь по пучку для коррекции полей квадруполей системы вывода выключена.

С включением обратной связи, которая вносит заметные осцилляции в качество вывода пучка (Рис. 5, а), поле кикера приводит к заметному улучшению равномерности вывода (Рис. 5, б). Похожие эффекты наблюдаются и в измерениях (Рис. 5, в-г).

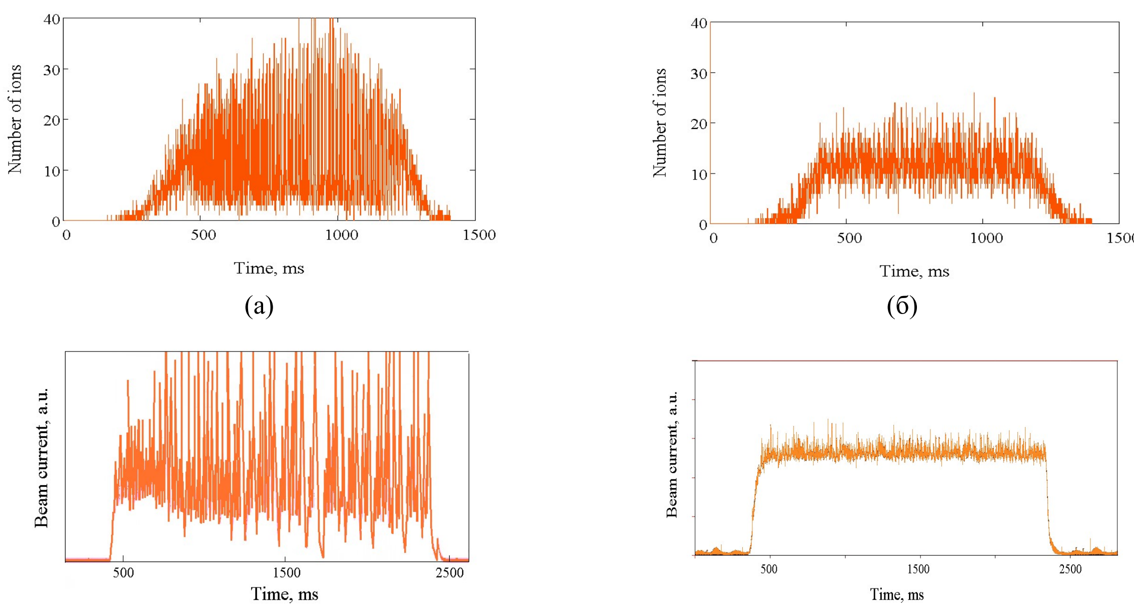


Рис. 5. Ток выведенного пучка с включенной обратной связью без использования поля кикера (а, в), и с полем кикера и включенной обратной связью (б, г); расчет (а) и (б) и измерения (в) и (г). Бо́льшие флуктуации в вычислениях, вероятно, связаны с большей полосой регистрации тока пучка. В проведенных измерениях полоса пропускания была ограничена сверху величиной 10 кГц.

Также расчеты показывают, что белый шум, подаваемый в качестве сигнала на кикер, наиболее эффективен с точки зрения улучшения равномерности вывода пучка по сравнению с различными модулированными сигналами спектры которых представлены набором узких полос. Вариация амплитуды сигнала и частоты работы кикера в некоторых границах также не приводят к заметному эффекту.

ИЗМЕРЕНИЯ

Информация, доступная из измерений, сводится к измерению положения замкнутой орбиты в ускорителе и тока выводимого пучка, измеряемого сцинтилляционным счетчиком, который регистрирует каждый ион в конце канала вывода. Измерения орбиты (Рис. 6) показывают, что пучок в области входа в выводную систему смещен наружу на 10 мм, что, согласно расчетам, приводит к снижению эффективности вывода пучка до 80%.

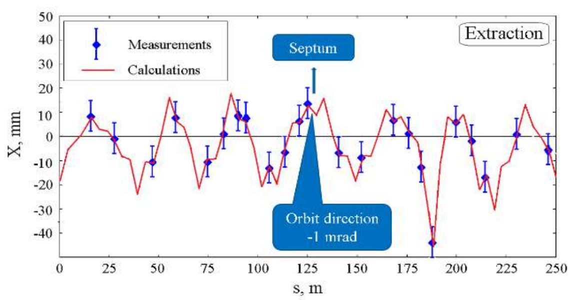


Рис. 6. Измеренная и расчетная орбиты пучка, ускоренного до конечной энергии.

Более значимым является направление орбиты пучка на входе в ЭС, где пучок направлен под углом 1 мрад внутрь. Количество потерь ионов на ноже ЭСС определяется отношением толщины ножа к шагу орбит ионов. Рассогласование между направлением пучка и ориентацией ЭСС увеличивает эффективную толщину ножа, ведя к росту потерь частиц. Расчетным путем получена зависимость эффективности вывода пучка от вариации угла его влета в ЭСС (Рис. 7).

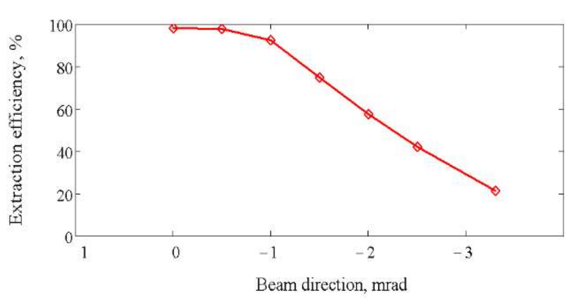


Рис. 7. Зависимость эффективности вывода пучка от угла влета пучка в электростатический септум.

Анализ показывает, что эффективность вывода пучка уменьшается до 40 %, которые наблюдаются в измерениях, при влете пучка в ЭСС под углом -2.5 мрад. Основываясь на данных измерений орбиты пучка и расчетах, можно заключить, что имеющие место горизонтальный сдвиг пучка и отклонение угла его влета в ЭСС от требуемых значений могут значительно снизить эффективность вывода пучка вплоть до наблюдаемой в измерениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показывают, что имеющаяся система позволяет выводить пучок с эффективностью вывода более 90%. В измерениях с пучком определены оптимальные величины полей секступольных магнитов, с которыми получена максимальная эффективность вывода пучка. Полученные данные хорошо согласуются с расчетными оценками. Низкая эффективность вывода пучка в измерениях объясняется искажениями орбиты и рассогласованием угла влета пучка с ориентацией электростатического септума.

Расчеты показывают, что эффективность вывода может быть увеличена за счет уменьшения искажений орбиты в области входа в выводную систему и согласованием направления пучка в этой области. Для экспериментальной проверки заявленных положений разрабатывается как комплекс программного обеспечения для глобальной коррекции орбиты на больших рабочих энергиях, так и отдельные программные блоки для коррекции угла влета пучка в систему вывода с помощью локальных искажений орбиты.

В расчетах подтвержден экспериментальный факт, что поле кикера, работающего с белым шумом, ведет к улучшению равномерности вывода пучка. Видимо, причина в том, что модуляция временной зависимости пучка вносится системой обратной связи, которая не способна отрабатывать с большими скоростями. Поле кикера, работающего с высокой частотой, компенсирует флуктуации продольной плотности частиц выведенного пучка, вносимые системой обратной связи.

Расчеты также предсказывают рост величины горизонтального эмиттанса выведенного пучка с увеличением эффективности вывода пучка.

Авторы выражают благодарность Горбачеву Е.В. и Седых Г.С. за помощь в проведении измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] B. Vasilishin, V. Volcov, I. Issinsky, V. Mikhailov, “Beam slow extraction system of Nuclotron”, in Proc. of Relativistic nuclear physics: from hundreds MeV to TeV, Slovak republic, Stara Lesna, 1999.

[2] N.N. Agapov et.al., “Slow beam extraction from the Nuclotron”, in Proc. of PAC 2001.

[3] https://uspas.fnal.gov/resources/downloads.shtml

[4] Andrea Latina, “Introduction to transverse beam dynamics”, Joint University Accelerator School - January 2015.

[5] Tapio Saramaki, “Finite Impulse Response Filter Design”, Handbook for Digital Signal Processing, ISBN 0-471-61995-7, 1993.

[6] T. Shiokawa, Y. Okugawa, T. Kurita, T. Nakanishi, “Slow beam extraction method from synchrotron for uniform spill and fast beam switching using an RF knockout method of

multi-band colored noise signal – POP experiment and simulation", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 1010 (2021) 165560.
[7] Sandro Rossi, "Simple theory of slow extraction from a synchrotron", CERN, 13-14 February 1996.
[8] V. Lebedev, V. Parkhomchuk, V. Shiltsev, and G. Stupakov, "Emittance growth due to noise and its suppression with the feedback system in Large Hadron Collider", Particle Accelerators, 1994, Vol. 44, pp. 147-164.

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛИННОГО ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА С ПРОДОЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ПРОЕКТА УНК-СИЛА

А. Д. Овсянников†, Д. А. Овсянников,
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
Д. Н. Арсланова, К. В. Борисенко, Ю. Н. Гавриш, Е. И. Гапионок, В. П. Кухтин, Е. А. Ламзин, А. Н. Неженцев, И. Ю. Родин, С. Е. Сычевский, Н. А. Шатиль,
АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Цель работы состоит в создании вычислительных моделей т.н. «длинного дипольного магнита с продольным градиентом магнитного поля» для проекта ускорительно-накопительного комплекса «СИЛА» (УНК-СИЛА). Особенности этого магнита заключаются в применении в качестве источников поля высококоэрцитивных постоянных магнитов, использовании низкоуглеродистой стали, высоких требований к качеству распределения поля, потребности учёта взаимного влияния элементов магнитной системы ускорителя друг на друга. Всё это приводит к необходимости разработки детальных вычислительных моделей дипольного магнита, обеспечивающих достоверное описание системы на длительный период, вплоть до настройки, запуска и эксплуатации ускорителя. Исходная математическая пространственная модель создана на основе вычислительного комплекса программ КОМРОТ, разработанного в АО «НИИЭФА», зарегистрированного в РФ и верифицированного в ходе сопоставительных испытаний, в том числе в ряде международных проектов. Результаты численного моделирования с использованием комплекса КОМРОТ с требуемой точностью совпадали с данными измерений на циклотронах, созданных в ЛЯР ОИЯИ и АО «НИИЭФА». Результаты численного моделирования, согласующиеся с данными аналогичных расчётов для подобных магнитов, демонстрируют возможность эффективной расчётной поддержки разработки, создания и измерений экспериментальных образцов обсуждаемых магнитов.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительно-накопительный комплекс (УНК) 4-го поколения должен обеспечивать параметры, превосходящие характеристики существующих в настоящее время синхротронных источников излучения – в первую очередь, рекордный горизонтальный эмиттанс электронного пучка, а следовательно, и минимальный размер источника при высокой степени когерентности и яркости [1]. Такой УНК разрабатывается в АО «НИИЭФА» по заказу НИЦ «Курчатовский Институт».

Во всем накопительном кольце (НК) установки «СИЛА» есть 40 суперпериодов, из них 34 регулярных. В регулярном супер-периоде 4 длинных диполя с продольным градиентом, поле в которых создается с помощью постоянных магнитов. Первый из них DL1A, последний DL1E подобен первому, но симметрично расположен относительно середины супер-периода, а два других близких по конструкции магнита DL2B и DL2D еще предстоит численно разработать и исследовать на основе полученного опыта.

Цель работы заключалась в создании математической модели длинного диполя DL1A, позволяющей подобрать конструктивные особенности, которые будут удовлетворять всем необходимым рабочим условиям установки. Дипольный магнит должен обеспечивать заданные величины и однородности стационарного магнитного поля в рабочей области между полюсами, где размещена вакуумная камера.

Было разработано несколько параметрических вычислительных моделей и проведено более 100 расчетов, которые позволили определить оптимальную структуру диполя DL1A. В ходе расчетов была выяснена необходимость и размер зазора между отдельными модулями диполя, необходимость термомагнитного шунтирования, была выбрана конструкция дипольного магнита, подобраны размеры и положения используемых постоянных магнитов (ПМ) для обеспечения нужного уровня поля, выбраны профили полюсов модулей. Необходимо было предусмотреть и разработать технологию коррекции поля по результатам измерений, и все расчеты проводить с ее учетом.

Расчеты (2D и 3D) распределения магнитостатического поля магнита DL1A выполнялись с использованием комплекса программ КОМРОТ [2, 3], разработанного в АО «НИИЭФА».

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ

Описание диполя DL1A

Длинный дипольный магнит DL1A для НК проекта УНК-СИЛА состоит из пяти похожих по конструкции модулей, близко расположенных друг за другом в продольном направлении и формирующих в области прохождения пучка электронов поле ступенчатой формы. Модули обозначаются: DL1A_5, DL1A_4, DL1A_3, DL1A_2, DL1A_1. На рисунке 1 изображено фотореалистичное представление всего магнита DL1A, по разработанной с помощью программного комплекса КОМРОТ вычислительной модели. В связи с новизной данной проектируемой установки в России, исходный

† a.ovsyannikov@spbu.ru

вид диполя DL1A был составлен на основе описанной технической конструкции ESRF-EBS (аналог установки «СИЛА») [4].

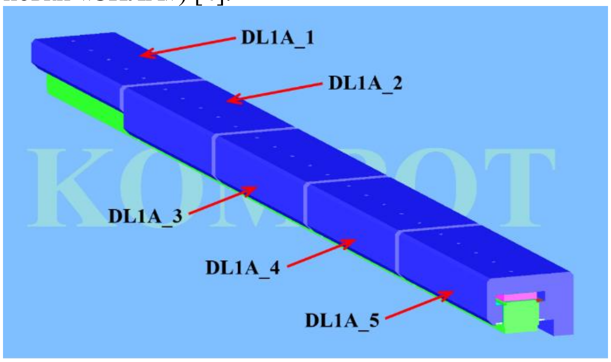


Рисунок 1: Симметричная половина диполя DL1A (расчетная модель КОМРОТ).

Особенностью данного диполя является то, что поле в нем создается с помощью ПМ. Это позволяет сэкономить занимаемое магнитом пространство и исключить какое-либо энергопотребление. Это же обстоятельство накладывает и ряд серьезных требований, как к конструкции дипольного магнита, так и к самим постоянным магнитам. Исходя из требований радиационной стойкости и температурной стабильности магнитных свойств, были выбраны магниты Sm2Co17. Для дополнительного уменьшения температурной зависимости поля магнита и, следовательно, поля в рабочей области должен быть применен механизм термомагнитного шунтирования с применением специальных термомагнитных материалов – сплавов FeNi («термаллоя») с «крутой» зависимостью индукции насыщения от температуры в рабочем диапазоне температур. Температурная зависимость магнитных свойств термаллоя взята из литературы [5]. Поскольку дипольный магнит настраивается только один раз, должен быть предусмотрен механизм подстройки поля изготовленного и собранного диполя – за счет подбираемых по результатам измерений магнитных шунтов.

Другой особенностью является то, что диполь должен формировать в продольном направлении, вдоль линии траектории пучка, поле ступенчатой формы – т.н. «поле с продольным градиентом». Исходя из этого, и был выбран вариант исполнения конструкции, при котором весь длинный дипольный магнит представляет собой совокупность пяти похожих по конструкции близко расположенных друг за другом модулей, каждый из которых формирует участок со своим предписанным уровнем поля. Поскольку модули расположены близко, неизбежны перетоки поля в соседние модули – поле одиночного модуля будет отличаться от поля этого же модуля в собранном диполе DL1A. Это взаимное влияние при проектировании также должно быть учтено в разрабатываемой математической модели.

Требуемые параметры к полю диполя DL1A НК УНК-СИЛА, приведены в таблице.

Таблица: Требуемые параметры к магнитному ступенчатому полю DL1A.

Модуль	**Поле [Тл]**	**%**
DL1A_5	0,4536	100%
DL1A_4	0,2634	58%
DL1A_3	0,1983	44%
DL1A_2	0,1542	34%
DL1A_1	0,1120	25%

Поставленные задачи

На начальном этапе формирования конструкции необходимо было решить расчетно-теоретическим путем ряд разноплановых вопросов. В частности:

- проверить вариант конструкции диполя подобный использованному в ESRF-EBS [4] (конструктивное исполнение и профиль полюса);
- оценить, как нужно изменить исходную конструкцию, чтобы получить требуемый уровень поля (в 1.5 раза меньше, чем у ESRF-EBS);
- оценить необходимость изготовления полюса и магнитопровода из низкоуглеродистой стали типа ARMCO с низкой коэрцитивной силой;
- оценить влияние дискретности и разноразмерности ПМ в сборке на распределение поля вдоль продольной оси каждого модуля диполя;
- оценить, как влияют друг на друга соседние модули, выстроенные в ряд, и как их нужно расположить, чтобы получить продольную ступенчатую функцию поведения поля;
- подобрать профиль полюса для каждого модуля, обеспечивающий требуемую однородность поля во всей рабочей области;
- выбрать (на основании данных справочников) термомагнитный материал для шунта, выбрать конструкцию термомагнитного шунта, определить его влияние на поле в рабочей области при различных температурах;
- выбрать конструкцию корректирующего торцевого магнитного шунта, определить его влияние на поле в рабочей области, оценить диапазон регулирования уровня поля выбранным типом шунта.

Параметрическая вычислительная модель

Для решения поставленных задач и дальнейшей эволюции конструкции магнита в связи с его оптимизацией была разработана параметризованная вычислительная 3-D прецизионная модель, которая анализировалась с использованием комплекса программ КОМРОТ [2, 3]. В процессе разработки и первичной оптимизации диполя было выполнено более 100 2-D и 3-D полномасштабных расчётов с целью анализа выбранной модели магнита DL1A.

Первоначальный (базовый) вариант конструкции модуля диполя DL1A_5 без шунтирования, был частично заимствован из варианта конструкции ESRF-EBS [4], он и лег в основу универсальной параметризованной модели. На рисунке 2 приведены параметры модели дипольного магнита, варьируемые в ходе численных расчётов. Параметры модели меняются от варианта к варианту.

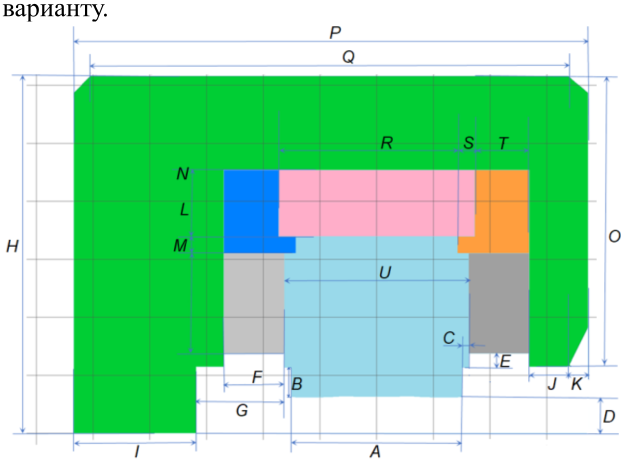


Рисунок 2: Параметрическая модель модуля диполя DL1A_5 на основе ПМ, начальная конфигурация.

Поиск оптимальных параметров

В ходе первых расчетов и анализа полученных результатов на вычислительных 2-D и 3-D моделях был выбран оптимальный вариант DL1A под названием «Opt-1» с горизонтальными и вертикальными ПМ для четырех схожих модулей DL1A_5, DL1A_4 DL1A_3 DL1A_2, и только с горизонтальными ПМ для DL1A_1. Был проведен ряд расчетов, направленных на определение материала, из которого будет производиться магнитопровод и полюса модулей. На этапе рассмотрения вычислительной модели Opt-1, уже были выявлены:

- свойства материалов и габариты магнитопровода, ПМ и полюса для получения примерно в 1,5 раза меньшего уровня поля в каждом модуле, чем в ESRF-EBS;
- необходимость торцевого шунтирования модулей и примерный зазор между соседними модулями;
- необходимость термомагнитного шунтирования, для компенсации температурной зависимости постоянных магнитов;
- выявлено, что для первого приближения достаточно рассмотреть профиль полюса подобный использованному в ESRF-EBS.

В варианте Opt-1 четыре первых модуля диполя DL1A имеют одинаковую конструкцию, но разное заполнение ПМ. Эти модули состоят из магнитопровода, боковых накладок на магнитопровод, полюсов, боковых сборок ПМ с торцевыми шунтами (толщина шунта 1мм), горизонтальных сборок ПМ, термомагнитных шунтов на боковых ПМ, алюминиевых вставок. На рисунке 3 изображена симметричная половина модуля DL1A_5 в поперечном сечении. Последний из пяти модулей (DL1A_1) конструктивно отличается отсутствием боковых сборок ПМ и торцевых шунтов, укороченными боковыми накладками на магнитопроводе, и увеличен зазор между полюсами за счет уменьшенных по высоте полюсов. Все сборки ПМ состоят из пяти секций по 80 мм, заполненных в соответствии с требуемыми параметрами каждого модуля: для горизонтальных ПМ высота и ширина ПМ равны 13 мм и 60 мм соответственно, для вертикальных ПМ - 13 мм и 30 мм соответственно.

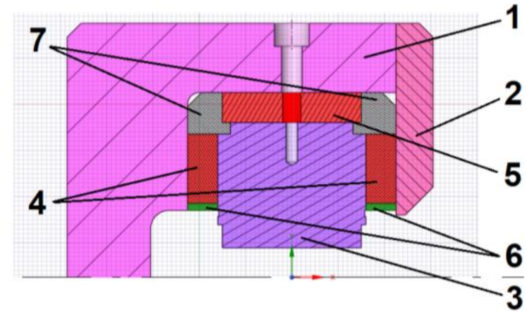


Рисунок 3: Симметричная половина модуля DL1A_5 в поперечном сечении (1 – магнитопровод, 2 - боковая накладка на магнитопровод, 3 – полюс, 4 – боковые ПМ, 5 – горизонтальный ПМ, 6 – термомагнитные шунты, 7 – алюминиевые вставки).

Было рассмотрено несколько схем заполнения ПМ для разных модулей, это дало представление, как сильно влияет дискретность и разноразмерность ПМ в сборке. По результатам такого вычислительного исследования были отобраны наиболее подходящие, обеспечивающие равномерность создаваемого поля вдоль оси пучка.

Для достижения однородного поля в области прохождения пучка электронов требуется профилирование полюсов модулей DL1A. Профиль полюса для варианта Opt-1 был выбран наподобие профиля в ESRF-EBS [4] с возможностью дальнейшей корректировки. В модуле DL1A_1 использовалась та же линия профиля, но полюса находятся на большем расстоянии друг от друга: зазор между полюсами в DL1A_5 равен 25.5 мм, а в DL1A_1 – 30.5 мм. В ходе ряда расчётов стало ясно, что для модуля DL1A_1 необходимо подбирать свой индивидуальный профиль полюса.

В ходе исследований был предложен и разработан вариант «Opt-2» длинного дипольного магнита DL1A, в каждом модуле которого используются только горизонтальные сборки ПМ. Для такого варианта были так же проведены исследования влияния схемы заполнения ПМ, влияния профиля полюса, влияния торцевых и термомагнитных шунтов на магнитное поле конструкции, влияние модулей друг на друга. В результате был подобран профиль полюса модуля DL1A_5, обеспечивающий поперечное постоянное поле в рабочей области, удовлетворяющий требованиям допустимой неоднородности (±0.02%). На основании проведенных расчетов были выбраны толщины термомагнитных шунтов, для компенсации температурной зависимости постоянных магнитов. Выполнен анализ влияния толщины торцевого шунта на рабочее поле в зависимости от степени заполнения модуля постоянными магнитами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием комплекса программ КОМРОТ была разработана параметризованная вычислительная 3-D прецизионная модель магнитной системы длинного диполя с продольным градиентом на постоянных магнитах DL1A накопительного кольца УНК-СИЛА. Вычислительная модель позволяет исследовать влияние как размерных параметров конструкции, так и магнитных и термомагнитных свойств материалов, способов заполнения модулей постоянными магнитами с ограничением по типоразмерам, способов магнитного и термомагнитного шунтирования, наличия технологических отверстий, взаимного расположения модулей друг относительно друга.

В процессе разработки и первичной оптимизации конструкции диполя было выполнено более 100 2-D и 3-D магнитостатических расчётов. В работе описаны результаты, полученные на вычислительных моделях магнита DL1A. Расчетно-теоретическим путем был решен ряд вопросов. В частности:

- Был исследован вариант конструкции диполя, подобный принятому в ESRF-EBS. По сравнению с ESRF-EBS в проекте УНК-СИЛА модули дипольного магнита должны иметь большую эффективную длину и обеспечивать в 1.5 раза меньший уровень поля. Анализ выполненных расчетов стал основой для разработки вычислительных моделей и поиска оптимальных вариантов магнита DL1A НК УНК-СИЛА.
- Анализ проведенных расчетов на вычислительных моделях с различными материалами магнитопровода и полюса показал необходимость их изготовления из низкоуглеродистой стали типа ARMCO с низкой коэрцитивной силой.
- Для модулей DL1A_5-DL1A_2 при заданном межполюсным зазоре (25.5мм) выбран профиль рабочей поверхности полюса, обеспечивающий однородность поля (±0.02%) в поперечном горизонтальном направлении в пределах рабочей области (±13мм). Тот же профиль полюса в модуле DL1A_1, имеющем увеличенный зазор (30.5мм), не обеспечивает требуемую однородность, что обуславливает необходимость отдельной оптимизации для данного модуля
- Распределение постоянных магнитов вдоль длины модуля влияет на однородность поля в продольном направлении. При рассмотренных типоразмерах ПМ для каждого модуля выбраны схемы заполнения, при которых продольная неоднородность не превышает 0.8% Требуется дальнейшая оптимизация схем сборок ПМ.
- При выбранной схеме типоразмеров постоянных магнитов отклонение величины интеграла поля от требуемого варьируется от +11.5% (в DL1A_5) до –4% (в DL1A_4). Эти отклонения слишком велики для того, чтобы их можно было компенсировать только корректирующим шунтом. Необходима дальнейшая оптимизация конструкции. Эта оптимизация должна также учитывать взаимное влияние модулей, т.к. они расположены близко друг к другу.
- Была проведена оценка влияния друг на друга соседних модулей магнита DL1A, выстроенных в ряд при последовательном «включении» сборки ПМ на 100%. Зазор между модулями равен 7 мм.
- На основании расчетов выбраны толщины термомагнитных шунтов в конструкции диполей для компенсации температурной зависимости постоянных магнитов. Выполнен анализ зависимости необходимой толщины термомагнитного шунта и его влияния на рабочее поле от степени заполнения модуля постоянными магнитами.
- Выбран диапазон толщин торцевых регулирующих шунтов для точной экспериментальной настройки поля каждого модуля. Выполнен анализ влияния толщины торцевого шунта на рабочее поле в зависимости от степени заполнения модуля постоянными магнитами.
- По результатом проведенных численных исследований был выбран сортамент (набор типоразмеров) постоянных магнитов для изготовления лабораторных макетов модулей длинного диполя для последующих натурных исследований и измерений и отладки технологий.

Все расчеты проводились с использованием наиболее ожидаемых магнитных и термомагнитных свойств материалов. Поскольку конструкция магнита сильно зависит от этих свойств, необходимы будут и следующие этапы: измерений всех необходимых свойств материалов, натурного макетирования, измерений поля в зазоре, сравнения его с расчетным, и коррекции конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] I.A. Ashanin, Yu A. Bashmakov, V.A. Budkin, A.G. Valentinov, M.A. Gusarova, D.K. Danilova, A.A. Dementev, V.V. Dmitriyeva, N.S. Dudina, V.S. Dyubkov, et al. Conceptual design of a dedicated fourth-generation specialized synchrotron radiation source (ssrs-4) at the Kurchatov Institute. Physics of Atomic Nuclei, 81(11): 1646–1651, 2018.

[2] A. Belov, T. Belyakova, V. Kukhtin, E. Lamzin, S. Sytchevsky, O. Filatov, Computer code for 3D simulation of magnetic fields, analysis and synthesis of magnetic systems for electrophysical devices (KOMPOT/M 1.0). Registration number 2003612492 of 12.09.2003. Rospatent, RF Program Register.

[3] V.M. Amoskov, A.V. Belov, V.A. Belyakov, T.F. Belyakova, Yu.A. Gribov, V.P. Kukhtin, E.A. Lamzin, S.E. Sytchevsky, Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks, Plasma Devices Oper., 2008, vol.16, p.89.

[4] "ESRF General Documentation", ESRF, https://esrf.fr/cms/live/live/en/sites/www/home/about/documentation.html

[5] Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник/Под ред. Ю.М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 528 с.

РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ КОРОТКОГО ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ИСТОЧНИКА СИНХРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УНК-СИЛА

А. Д. Овсянников†, Д. А. Овсянников,
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
Д. Н. Арсланова, К. В. Борисенко, Ю. Н. Гавриш, Е. И. Гапионок, Н. С. Знаменщикова,
В. П. Кухтин, Е. А. Ламзин, А. Н. Неженцев, И. Ю. Родин, С. Е. Сычевский, Н. А. Шатиль,
АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Обсуждаемые в работе вычислительные модели т.н. «коротких дипольных магнитов» накопительного кольца проекта УНК-СИЛА, описывают магниты, использование которых отличает проект среди других. Пространственная прецизионная модель, использующая российский комплекс программ КОМРОТ, обеспечивает расчёт распределений магнитных полей и пондеромоторных сил. Модель допускает расширение в случае необходимости учёта влияния других элементов магнитной системы с требуемой для практических целей степенью детализации. При этом во внимание принимаются свойства постоянных магнитов, магнитных сталей, геометрическая форма постоянных магнитов и токонесущих элементов (при наличии). Рассматриваются вопросы термо- и магнитного шунтирования, необходимых для обеспечения требуемых характеристик магнитов. Использование разработанной вычислительной модели позволило осуществить предварительный выбор свойств материалов, провести оптимизацию конструкции диполя.

ВВЕДЕНИЕ

Российский проект УНК-СИЛА [1] представляет собой комбинацию синхротронного накопительного кольца (НК) с энергией электронов 6 Гэв и лазера на свободных электронах. Такая гибридная конфигурация позволяет сочетать достоинства обеих систем и при этом минимизировать затраты на их создание и эксплуатацию за счёт использования единого инжекционного комплекса и общей инфраструктуры.

Проектируемый ускоритель относится к синхротронным источникам четвёртого поколения, в которых используются магнитная структура HMBA (Hybrid Multi Bend Achromat), позволяющая достичь рекордных параметров источника.

В качестве референсной, как оптической, так и магнитной структуры при разработке проекта УНК-СИЛА была взята структура европейского источника ESRF-EBS [2]. Одним из отличий является наличие в центральной части регулярного периода накопителя СИЛА короткого дипольного магнита SBM (Short Bend Magnet), позволяющего удвоить число каналов вывода излучения (см. рисунок 1). Конструкция магнита предусматривает использование технически чистого железа для изготовления магнитных полюсов и постоянных магнитов (ПМ) из редкоземельного сплава Sm_2Co_{17}.

В рамках существующего Технического задания (ТЗ) должна быть разработана конструкторская документация, отвечающая этапу технического проектирования, и изготовлен экспериментальный образец дипольного магнита.

В работе приводятся результаты численного моделирования поля и выбора магнитной конфигурации, являющиеся расчётным обоснованием конструкции магнита SBM.

Численные расчёты с использованием 3-D детальных моделей проводились на основе комплекса вычислительных программ КОМРОТ [3, 4].

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ SBM

Технический облик дипольного магнита с указанием составляющих его частей представлен на рисунках 2, 3. Конструкция магнита является симметричной относительно плоскости Y = 0.

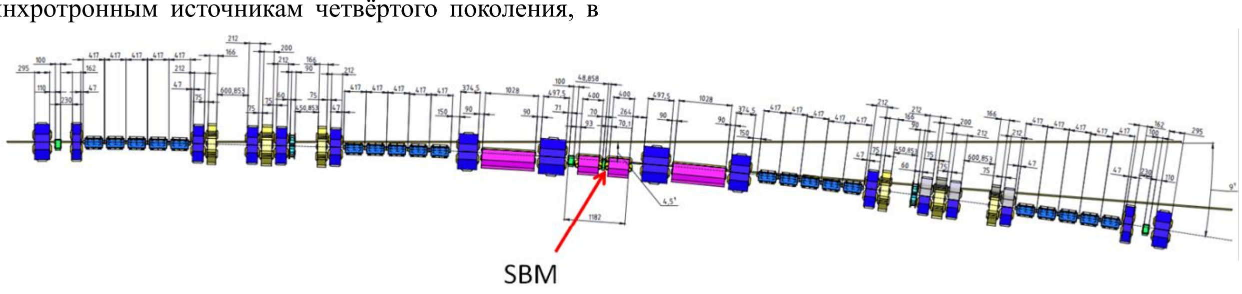


Рисунок 1: Расположение короткого магнита SBM в структуре периода накопительного кольца.

† a.ovsyannikov@spbu.ru

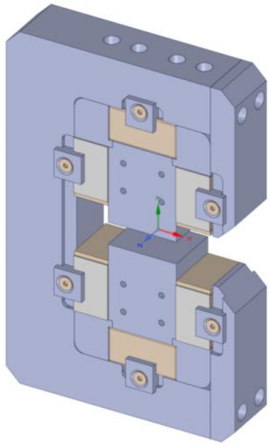


Рисунок 2: Дипольный магнит SBM.

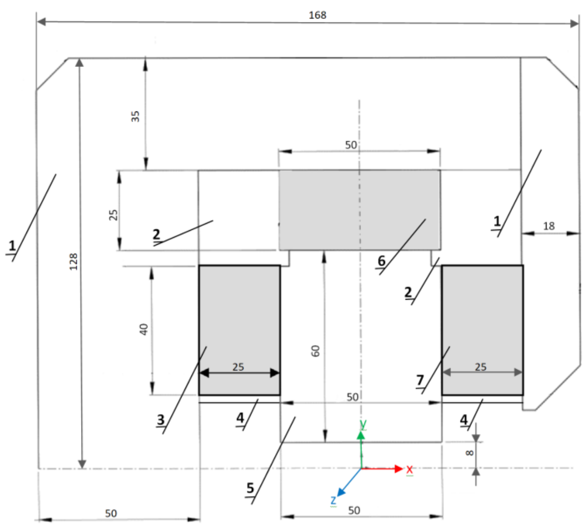


Рисунок 3: Структура дипольного магнита SBM в сечении, верхняя симметричная половина (1 - магнитопровод; 2 – немагнитная вставка; 3,6,7 – ПМ; 4 - термомагнитный шунт; 5 - полюс).

Магнитопровод и полюса магнита изготавливаются из технически чистого железа (АРМКО), которому отвечает низкое значение коэрцитивной силы.

Магнитное поле в диполе создаётся с помощью постоянных магнитов, изготовленных в форме прямоугольных параллелепипедов из редкоземельного сплава Sm_2Co_{17}.

Sm-Co магниты характеризуются высокой радиационной стойкостью и достаточно высокой температурной стабильностью магнитных свойств. Тем не менее, чтобы избежать дрейфа поля в рабочем диапазоне температур, в конструкции магнита предусмотрены термомагнитные шунты, представляющие собой пластины из термомагнитного материала, устанавливаемые на боковых ПМ (см. рисунок 3).

В горизонтальных частях магнитопровода и постоянных магнитов предусмотрены по два отверстия диаметром d = 8 мм для крепления ПМ и полюса.

Для окончательной настройки поля используются магнитные шунты в виде торцевых пластин на боковых ПМ.

Основные геометрические размеры дипольного магнита указаны на рисунке 3.

Используемые конструкционные материалы характеризуются следующими магнитными свойствами:

- материал магнитопровода и полюсов - технически чистое железо с магнитной проницаемостью не менее μ=7500 и коэрцитивной силой не более H_c=66 А/м (в соответствии с требованием ТЗ);
- Sm-Co магниты: остаточная индукция - B_r=1,12 Тл, коэрцитивная сила по индукции - H_{cb}=810 кА/м, μ=1;
- температурная зависимость B_r - α = -0,035 %/°С;
- термомагнитный материал – термаллой с термомагнитными параметрами, отвечающими зависимостям, представленными на рисунке 4 [5]

Как видно, с повышением температуры магнитная проницаемость термомагнитного шунта падает, что приводит к ослаблению его шунтирующего действия и возрастанию рабочего поля магнита SBM.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Согласно ТЗ, считается заданным поле в зазоре магнита 0,8602 Тл и его эффективная длина 48,848 мм, которые определяют интеграл поля вдоль траектории пучка электронов, равный 0,04202 Тл*м. При этом допустимая величина отклонения интеграла поля в пределах рабочей области шириной ±13 мм составляет ~$2{\cdot}10^{-4}$.

Интеграл поля является одним из основных критериев, выполнение которого необходимо обеспечить при разработке конструкции дипольного поворотного магнита SBM.

Разработанная 3D расчетная модель использовалась для исследования влияния на поле магнита SBM следующих факторов:

- толщины термомагнитного шунта h_{term};
- толщины магнитного шунта h_m;
- крепёжных отверстий.

Были получены зависимости:

- индукции для различных вариантов конструктивного исполнения магнита (см. таблицу и рисунок 5);
- интеграла поля, вычисляемого в рассматриваемом случае вдоль продольной оси магнита, от толщины термошунтов (рисунок 6) и температуры;
- температурной зависимости поля магнита в рабочей области от толщины термошунтов (рисунок 7);
- интеграла поля от толщины магнитных шунтов (рисунок 8).

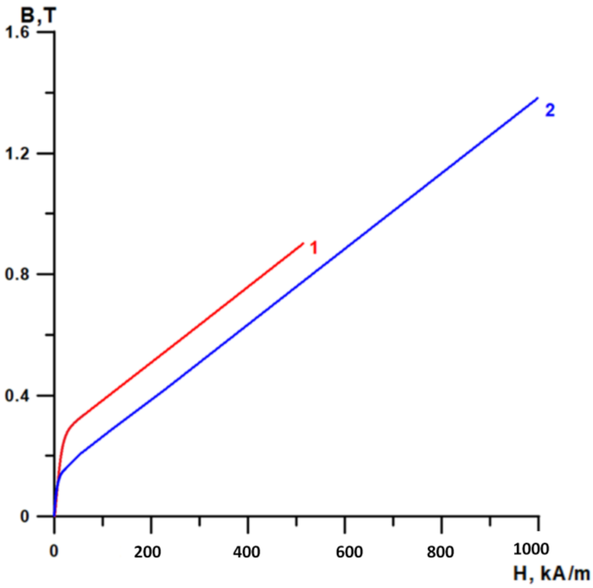


Рисунок 4: Магнитные свойства B(H) термаллоя в зависимости от температуры (1 - при T = 20°C, 2 - при T = 40°C).

Таблица. Интеграл поля ∫Bydz (без учёта крепёжных отверстий), T = 20°C

№	Габариты SBM	h_{term}, мм	h_m, мм	$\int B_y dz$, Тл*м
1	168*256*40	0	1	0,041109
2	168*256*40	1	0	0,042964
3	168*256*42	1	1	0,043183
4	168*256*40	1	1	0,040960
5	168*256*40	3	1	0,040657

Графики на рисунке 5 показывают характерные распределения поля в продольном направлении для различного конструктивного исполнения магнита.

Рисунок 6 демонстрирует линейную зависимость интеграла поля от толщины термошунтов.

Коэффициент температурной зависимости поля магнита вычислялся по формуле:

$S = ((I_{T2}-I_{T1})/I_{cp.})/\Delta T \cdot 100\%$, где $I = \int B_y dz$, $T1 = 20°C$, $T2 = 40°C$, $\Delta T = T2-T1$, $I_{cp} = (I_{T1}+I_{T2})/2$.

Как видно из рисунка 7, этот коэффициент также линейно зависит от толщины термошунта. Тогда можно определить оптимальную толщину термошунта $h_{term} = 4$ мм, при которой $S = 0{,}035$ %/°C, чтобы полностью скомпенсировать влияние температурной зависимости ПМ ($\alpha = -0{,}035$ %/°C). на поле магнита в рабочем диапазоне температур.

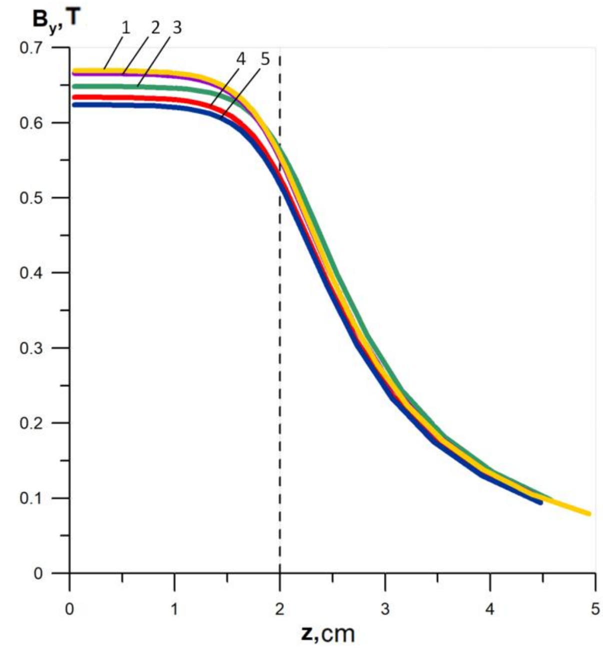


Рисунок 5: Поле вдоль продольной оси магнита (линии на графике соответствуют таблице выше).

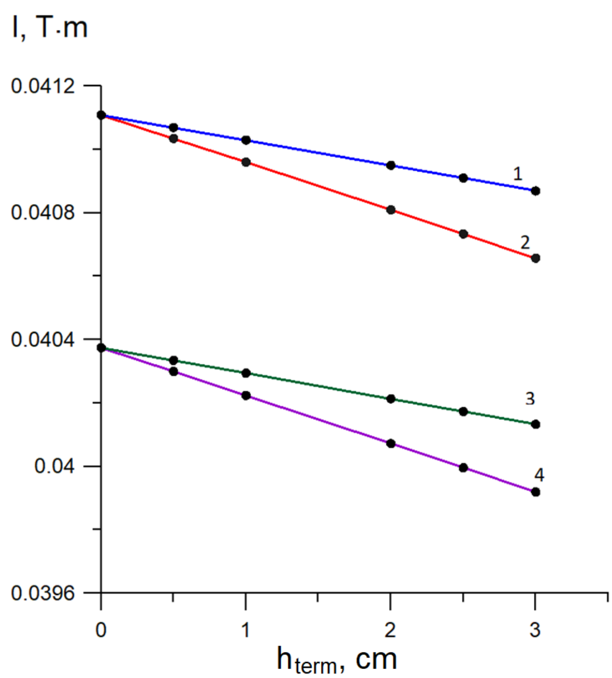


Рисунок 6: Зависимость интеграла поля от толщины термошунтов (1 - T = 40°C без отверстий; 2 - T = 20°C без отверстий; 3 - T = 40°C с отверстиями; 4 - T = 20°C с отверстиями).

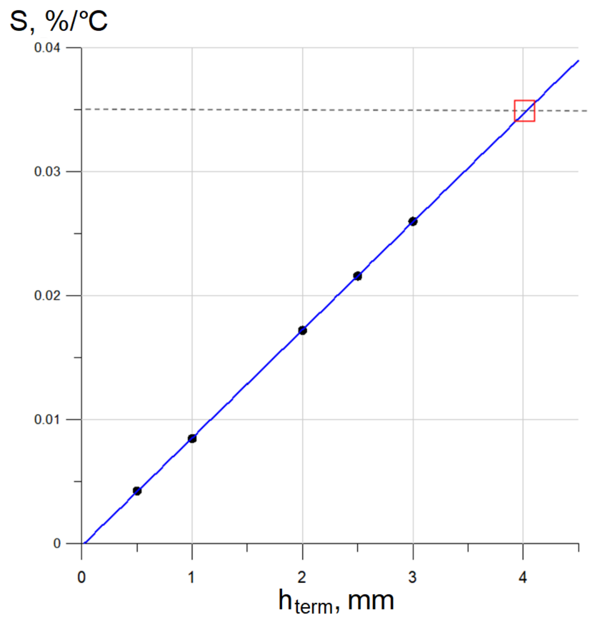


Рисунок 7: Влияние толщины термошунта на коэффициент температурной зависимости поля магнита.

Окончательная настройка уровня поля в SBM осуществляется с помощью магнитных шунтов. Рисунок 8 демонстрирует линейную зависимость интеграла поля от толщины магнитных шунтов. При этом коэффициент пропорциональности составляет -5,5%/мм. Таким образом, варьирование толщины магнитных шунтов в пределах 1 мм даёт возможность регулировки как уровня рабочего поля магнита, так и интеграла поля в пределах 5%.

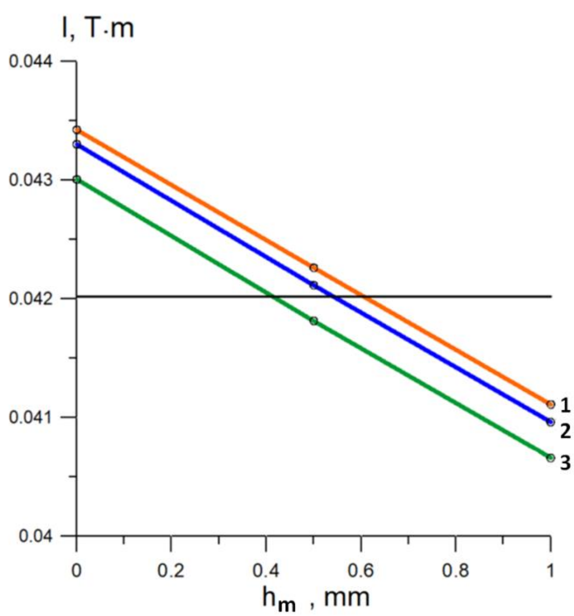


Рисунок 8: Зависимость интеграла поля от толщины магнитных шунтов при T=20°C (1 – $h_{term} = 0$; 2 - $h_{term} = 1$ мм; 3 - $h_{term} = 3$ мм).

ВЫВОДЫ

В работе описаны результаты численной оптимизации короткого дипольного магнита SBM накопительного кольца проекта синхротронного источника УНК-СИЛА. Конструкция магнита предусматривает использование технически чистого железа для изготовления магнитных полюсов и постоянных магнитов из редкоземельного сплава Sm_2Co_{17}.

Расчетно-теоретическим путем был решен ряд вопросов. В частности:

- Температурная стабилизация поля магнита в рабочем диапазоне температур осуществляется с помощью термомагнитного шунтирования. Выбраны оптимальные толщины термомагнитных шунтов для компенсации влияния температурной зависимости постоянных магнитов на рабочее поле SBM.
- Настройка уровня поля магнита осуществляется с помощью магнитных шунтов. Показано, что варьирование толщины магнитных шунтов в пределах 1 мм даёт возможность регулирования как уровня рабочего поля магнита, так и интеграла поля в пределах 5%. Требуются дополнительные исследования, связанные с обеспечением требуемых допусков на интеграл поля во всей рабочей области магнита.

По результатам проведенных численных исследований была выбрана магнитная конфигурация макета короткого дипольного магнита для проведения последующих натурных исследований и отладки технологии сборки магнита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] I.A. Ashanin, Yu A. Bashmakov, V.A. Budkin, A.G. Valentinov, M.A. Gusarova, D.K. Danilova, A.A. Dementev, V.V. Dmitriyeva, N.S. Dudina, V.S. Dyubkov, et al. Conceptual design of a dedicated fourth-generation specialized synchrotron radiation source (ssrs-4) at the Kurchatov Institute. Physics of Atomic Nuclei, 81(11): 1646–1651, 2018.

[2] “ESRF General Documentation”, ESRF, https://esrf.fr/cms/live/live/en/sites/www/home/about/documentation.html

[3] A. Belov, T. Belyakova, V. Kukhtin, E. Lamzin, S. Sytchevsky, O. Filatov, Computer code for 3D simulation of magnetic fields, analysis and synthesis of magnetic systems for electrophysical devices (KOMPOT/M 1.0). Registration number 2003612492 of 12.09.2003. Rospatent, RF Program Register.

[4] V.M. Amoskov, A.V. Belov, V.A. Belyakov, T.F. Belyakova, Yu.A. Gribov, V.P. Kukhtin, E.A. Lamzin, S.E. Sytchevsky, Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks, Plasma Devices Oper., 2008, vol.16, p.89.

[5] Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник / Под ред. Ю.М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 528 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ (LEBT)

А.С. Панишев, С.М. Полозов, В.Л. Шатохин, Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Канал транспортировки низкой энергии (LEBT) предназначен для передачи ионного пучка от различных ионных источников до ускорительных структур. Эффективность такой транспортировки во многом зависит и от вакуумных условий на участках канала. Рассмотрены различные методики расчета вакуумных условий внутри камер с разветвленной структурой линейного ускорителя ионов. На основании вакуумной схемы в программе Molflow+ была создана расчетная модель LEBT. Помимо стационарных газовых потоков, поступающих из ионных источников, выполнено моделирование динамики давления при импульсной газовой нагрузке. Процесс прохождения газового импульса также был рассчитан с помощью эквивалентных электрических цепей, построенных по аналогии с вакуумными цепями. Расчет сделан в программе LTspice, проведено сравнение полученных результатов по двум методам. Дана оценка способности выбранного откачного оборудования обеспечить требуемый вакуум.

Канал транспортировки низкой энергии (LEBT) [1] предназначен для передачи ионного пучка от различных ионных источников (ИИ) до резонатора ПОКФ. Он представляет собой разветвленную структуру каналов протяженностью 12,8 м с внутренним диаметром 62 мм, соединяющих ИИ, блоки диагностики пучка, камеры поворотных магнитов, резонатор-группирователь (рис. 1).

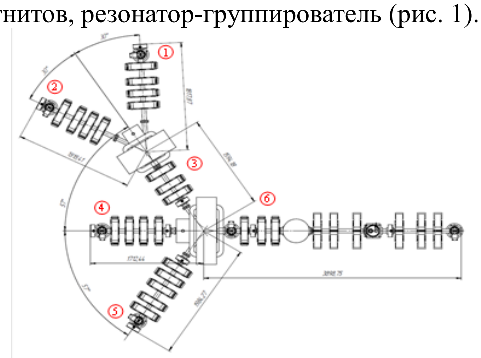


Рисунок 1: Структура каналов LEBT.

Помимо наличия каналов большой протяженности, откачка канала осложняется установленными камерами диагностики пучка по ходу движения ионов. Таких измерительных устройств вдоль вакуумного тракта возможно до 25 позиций различного вида. Для оценки влияния их геометрии на эффективность откачки и выбора оптимальных параметров насосов, были рассчитаны проводимости каждой камеры диагностики. С учетом полученных результатов была составлена схема откачки и подобрана быстрота действия насосов.

На основании вакуумной схемы в программе Molflow+ [2] была создана модель LEBT и запущен расчет вакуумных условий в стационарном режиме (рис. 2). Откачка производилась в следующих условиях: тепловая десорбция со стен камеры 10^{-9} (мбар·л)/(с·см^2), нагрузка от ИИ азотом, водородом и гелием газовым потоком $2{,}66\cdot10^{-4}$ мбар·л/с.

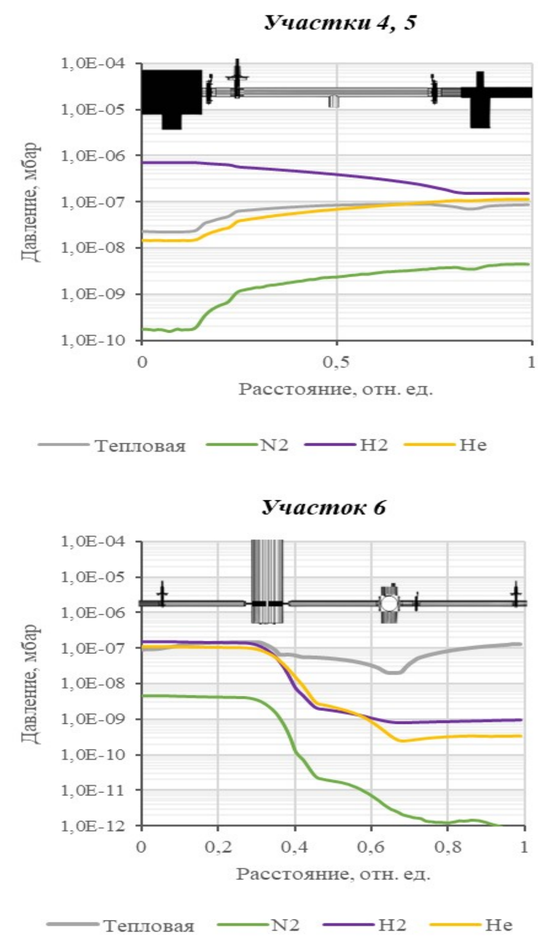


Рисунок 2: Стационарный режим газовых потоков.

После уточнения параметров работы ИИ стало понятно, что газовые нагрузки от них могут значительно превышать взятые раньше значения. Так, для получения токов до 10 мА необходимо будет обеспечить напуск газа на уровне $2{,}66\cdot10^{-2}$ мбар·л/с.

Поэтому дополнительно были исследованы режимы работы источника ионов водорода (ИИ №4) для двух значений газовой нагрузки $2{,}66 \cdot 10^{-4}$ мбар·л/с (линия H_2 на рис. 3) и $2{,}66 \cdot 10^{-2}$ мбар·л/с (линия H_{2+} на рис. 3), а также при отключенных источниках ионов (тепловая десорбция).

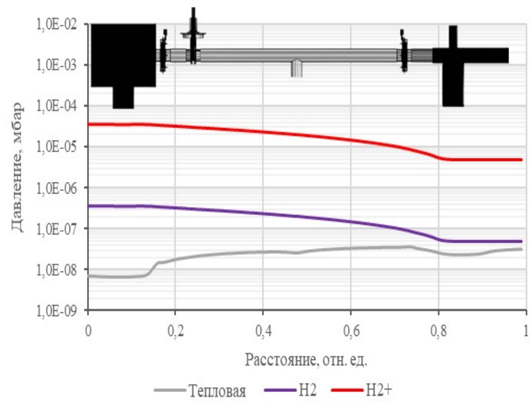


Рисунок 3: Газовая нагрузка при работе ИИ.

Анализ результатов расчёта показал, что при максимальной газовой нагрузке давление на порядки превышало требуемый уровень. Для решения этой проблемы был рассмотрен импульсный режим напуска газа в камеру ИИ. Для моделирования импульсной нагрузки от одного из ИИ использовалась следующая конфигурация: тепловая десорбция со стен камеры отсутствует, импульсная нагрузка водородом от ИИ №3 в виде прямоугольного импульса $t_{имп}$ = 10 мкс, амплитудой Q = $2{,}6 \cdot 10^{-2}$ мбар·л/с и частотой следования 5 Гц, производительность насосов S = 700 л/с, объем камеры ИИ V =0,2 л.

Согласно вакуумной теории, давление в такой системе будет изменяться по экспоненциальному закону:

$$\begin{cases} P_{\text{инж}}(t) = \dfrac{Q}{S} \cdot \left(1 - \exp\left(-\dfrac{t}{\tau}\right)\right), & t \le t_{\text{имп}} \\ P_{\text{отк}}(t) = P_{\text{инж}}(t_{\text{имп}}) \cdot \exp\left(-\dfrac{t - t_{\text{имп}}}{\tau}\right), & t > t_{\text{имп}} \end{cases}$$

Используя эти выражения, можно ожидать давление в ИИ в конце импульса на уровне $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ Па, а через 1 мс после импульса оно снизится до $7{,}1 \cdot 10^{-6}$ Па, что удовлетворяет требованию ТЗ.

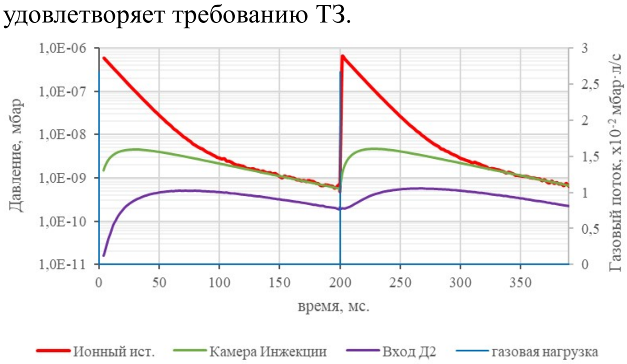


Рисунок 4: Графики импульсов давления в некоторых точках участках ИИ и LEBT.

Для проверки теоретических расчетов и учета влияния сложной геометрии вакуумных камер в программе Molflow+ [2] была создана модель LEBT и запущен расчет откачки в динамическом режиме с параметрами, указанными выше. Результаты на рис. 4:

Дополнительно переходный процесс был смоделирован методом электрических аналогий с помощью программы расчета электрических цепей LTspice. Используемые аналогии: газовый поток – генератор тока; проводимость – сопротивление цепи; объем – электрическая емкость. В таком формализме рассмотрена схема, включающая разрядную камеру ЭЦР с двумя торцевыми каналами откачки, выход потока через диафрагму в камеру инжекции с вакуумным насосом. Параметры импульсного генератора тока брались аналогичными расчетам импульсного потока в программе Molflow+. Полученные диаграммы напряжений эквивалентны графикам давления. Представлены данные по разрядной камере – красный, и камере инжекции – синий (узловые точки на схеме рис. 5). Видно хорошее совпадение результатов расчетов по двум методикам.

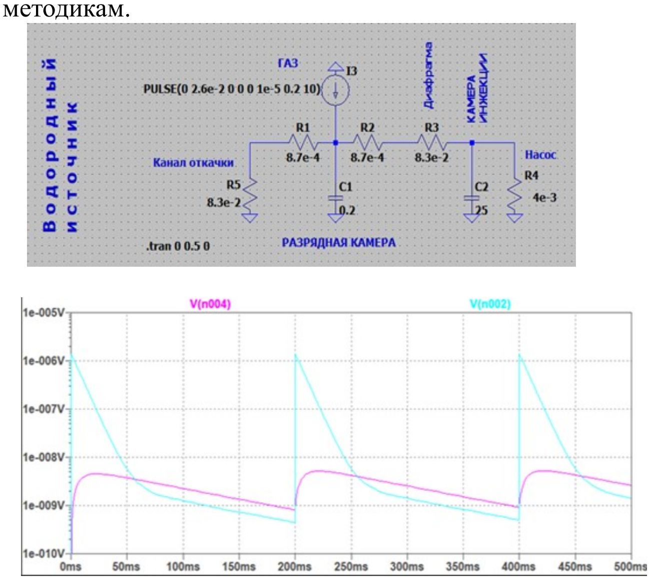


Рисунок 5: Модель импульсной нагрузки методом электрических цепей, схема и диаграммы напряжений.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что предложенная схема откачки справляется с ожидаемой газовой нагрузкой от ИИ, выбранной производительности насосов достаточно для нейтрализации скачков давления.

ЛИТЕРАТУРА

[1] S.M. Polozov, A.S. Panishev, V.L. Shatokhin, (2021). Optimization of accelerators vacuum structures pumping. 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC10

[2] Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow..

ЗАПУСК СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА В КАНАЛЕ БУСТЕР-НУКЛОТРОН КОМПЛЕКСА НИКА

Е.А. Бехтенев, ИЯФ СО РАН, Новосибирск и НГУ, Новосибирск
Г.В. Карпов, ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Аннотация

Система измерения положения пучка, разработанная и изготовленная в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера для канала Бустер-Нуклотрон комплекса НИКА, была успешно введена в эксплуатацию. Система включает в себя 7 электростатических четырех-координатных датчиков положения пучка (пикапов) и электронику. Основными проблемами, с которыми пришлось столкнуться в процессе запуска, были помехи от высоковольтного кикера и высыпание пучка на электродах пикапов. Был разработан специальный программный алгоритм, позволяющий восстанавливать исходную форму тока пучка. Разработано программное обеспечение на основе TANGO. Система измерения положения пучка позволила обеспечить проводку пучка через канал и настроить оптимальные оптические функции канала.

ВВЕДЕНИЕ

Разработанная и изготовленная в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера система измерения положения пучка [1] была введена в эксплуатацию на канале Бустер-Нуклотрон комплекса НИКА [2] в 2021г. Система выполняет однопролетные измерения положения пучка ионов, заряд которого может быть в диапазоне от 0.2 до 16 нКл. Частота инжекции пучка из Бустера в Нуклотрон равна 0.25 Гц. Система включает в себя 7 электростатических двух-координатных датчиков положения пучка (пикапов) и электронику. Электроника пикапов включает в себя 7 Предусилителей, расположенных рядом с пикапами, и 7 блоков обработки сигналов (BPM Processors), расположенных в защищенном помещении. Сигналы с выходов Предусилителей передаются в блоки обработки сигналов по коаксиальным кабелям через специальные трансформаторные развязки, уменьшающие уровень помех, проникающих в электронику.

ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Для канала Бустер-Нуклотрон были разработаны и изготовлены пикапы трех типов, отличающихся размерами. Основные параметры пикапов представлены в Таблице 1. Конструкция одного из типов пикапов с диаметром апертуры 125 мм представлены на Рис.1. Пикап другого типа с диаметром апертуры 60 мм представлены на Рис.2.

Таблица 1. Основные параметры пикапов.

Название параметра	Ед.	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Длина	мм	350	210	260
Апертура	мм	125	60	100
Общая ширина	мм	260	210	240
Геометрический фактор	мм	~77	~40	~64
Емкость электрода	пФ	~30	~30	~30
Погрешность в 50% апертуры по формулам (1)	мм	< 2	< 2	< 2
Погрешность в 50% апертуры по формулам (2)	мм	< 0.2	< 0.2	< 0.2

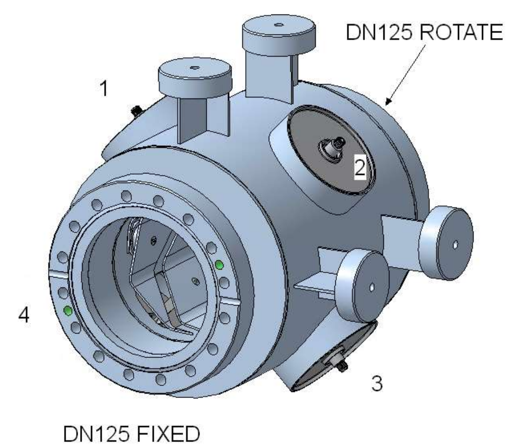


Рис.1. Пикап с апертурой 125 мм.

Рис.2. Пикап с апертурой 60 мм.

Пикап имеет 4 электрода. Он способен измерять положение пучка по обеим (горизонтальной и вертикальной) координатам на основе измеренных сигналов с четырех электродов U_1, U_2, U_3, U_4. Координаты пучка X, Y могут вычисляться по следующим упрощенным формулам:

$$X = K_X \times \frac{U_1 - U_2 - U_3 + U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4},$$

$$Y = K_Y \times \frac{U_1 + U_2 - U_3 - U_4}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4} \qquad (1)$$

где K_X, K_Y – геометрические факторы пикапа.

Для каждого из изготовленных пикапов на специальном измерительном стенде [2] измерялась так называемая координатная сетка – зависимость измеренных с помощью формул (1) координат от реальных координат измерительной антенны. Из-за нелинейности пикапов, а также технологических погрешностей их производства абсолютные погрешности измерения координат, вычисленных по этим формулам, в круге с диаметром, равным половине апертуры пикапа, могут достигать 2 мм. На основе полученных координатных сеток измерялись смещения нуля пикапа а также коэффициенты полиномов C_{Xij}, C_{Yij}, с помощью которых можно вычислить более точные координаты пучка по формулам:

$$X = \sum_{i,j} Cx_{i,j} x^i y^j \quad Y = \sum_{i,j} Cy_{i,j} x^i y^j, \qquad (2)$$

где x, y – координаты, вычисленные по формулам (1).

Координатные сетки для одного из пикапов, полученных по формулам (1) и (2) представлены на Рис.3, 4.

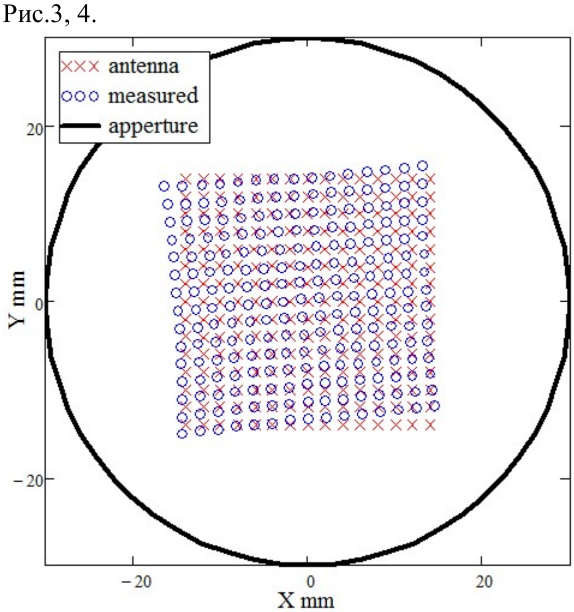


Рис.3. Координатная сетка для пикапа типа 3, полученная по формулам (1).

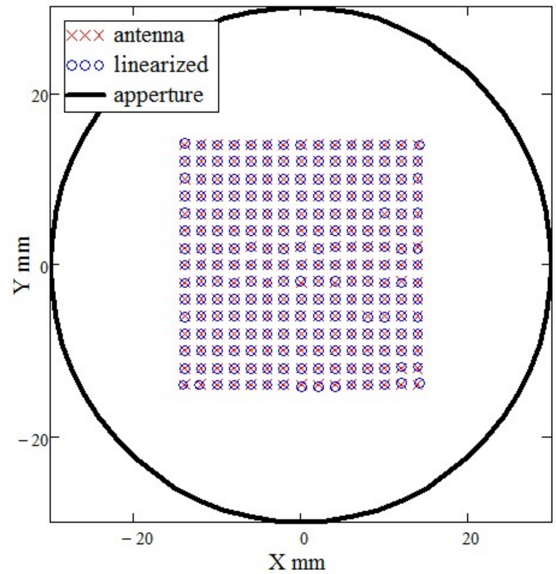


Рис.4. Координатная сетка для того же пикапа типа 3, полученная по формулам (2).

Использование полиномов в соответствие с формулами (2) позволяет как минимум на порядок уменьшить абсолютную погрешность измерения координат пучка из-за самих пикапов.

ЭЛЕКТРОНИКА ПИКАПОВ

Функциональная схема электроники для одного пикапа представлена на Рис.5.

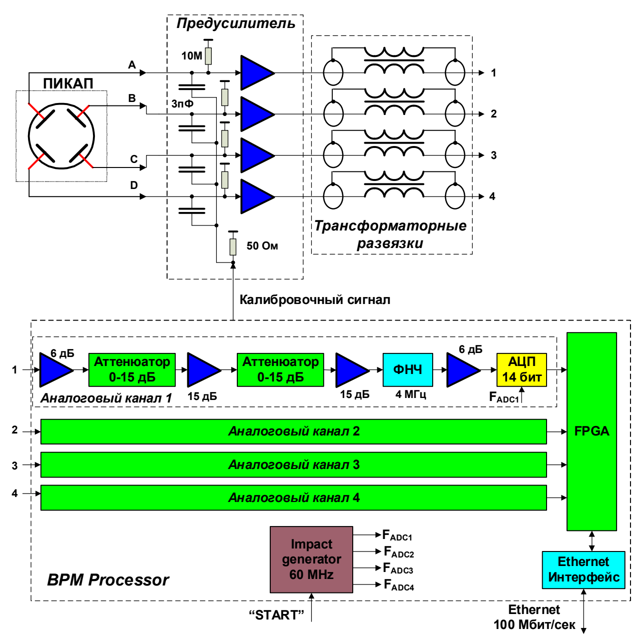


Рис.5. Функциональная схема электроники для одного пикапа.

Электроника состоит из Предусилителя, установленного рядом с пикапом, и блока обработки сигналов с пикапа ("BPM Processor"), находящегося в стойке в защищенной комнате. Предусилитель включает в себя 4 малошумящих усилителя с высоким входным сопротивлением и цепь калибровки. Сигналы с выходов Предусилителя через трансформаторные развязки по коаксиальным 50-омным кабелям поступают на входы блока “BPM Processor”. Из блока “BPM Processor” в Предусилитель подается калибровочный сигнал. Трансформаторные развязки примерно на порядок уменьшают уровень помех на электронику пикапа от высоковольтного кикера, на который подаются импульсы амплитудой до 40 кВ с фронтами в десятки наносекунд. Блок “BPM Processor” (Рис.6) включает в себя 4 идентичных аналоговых канала, вентильную матрицу (FPGA), Ударный генератор и Ethernet интерфейс.

Рис.6. Блок “BPM Processor”.

Ударный генератор сразу после прихода импульса “START”, синхронизиро ванного с перепуском пучка, генерирует сигнал выборок АЦП с частотой 60 МГц в течение времени примерно 1 мс. Сигналы с пикапа преобразуются в цифровой вид с помощью 14-разрядного АЦП. После этого с интервалом 75 мкс на входы Предусилителя поступают 4 калибровочных импульса. Использование 4-х калибровочных сигналов позволяют повысить отношение сигнала к шуму калибровки. Амплитуда калибровочных импульсов может регулироваться в диапазоне 30 дБ и задается в зависимости от установленного коэффициента передачи каналов. Сама калибровка позволяет существенно уменьшить погрешность измерения из-за неодинаковости коэффициентов передач каналов.

Функциональная схема Предусилителя представлена на Рис.7.

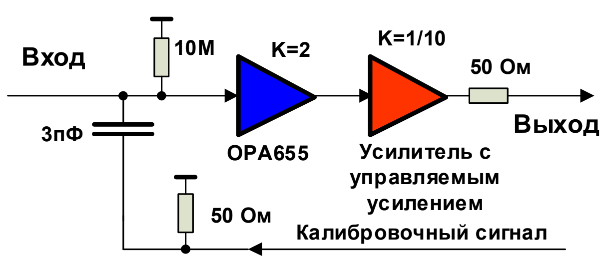


Рис.7. Функциональная схема Предусилителя.

На входе использован малошумящий усилитель OPA655 с полевыми транзисторами на входе и спектральной плотностью шума, приведенного ко входу ~6 $нВ/\sqrt{Гц}$. Коэффициент передачи Предусилителя может принимать 2 значения: 2 или 20 – в зависимости от заряда перепускаемого пучка. Калибровочные импульсы поступают на 4 входа через емкости 3 пФ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИ ЗАПУСКЕ КАНАЛА БУСТЕР-НУКЛОТРОН

Система измерения положения пучка была успешно применена при проводке пучка по каналу Бустер-Накопитель комплекса Ника в 2021г.

На рисунках 7, 8 показаны сигналы с пикапа от пролета пучка до и после обработки (в компьютере).

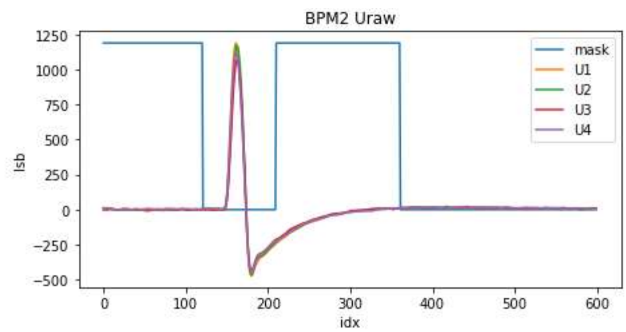


Рис.7. Необработанные сигналы с пикапа.

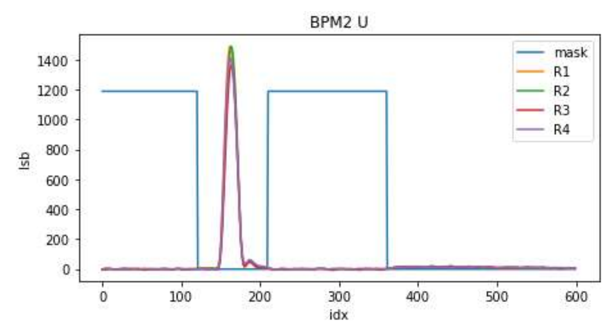


Рис.8. Сигналы с пикапа после обработки.

Обработка сигнала включает в себя восстановление его формы (Рис.8) и интегрирование в выделенном временном окне.

Относительная точность измерений определялась главным образом помехами на электронику от высоковольтного кикера. Уровень помех был больше примерно на порядок уровня собственных шумов электроники, причем он зависел от расстояния от того или иного пикапа до кикера. Чем ближе к кикеру был расположен пикап, тем выше был уровень помех. Тем не менее для всех пикапов была достигнута относительная точность порядка 0.1 мм, что было достаточно не только для проводки пучка, но для оптимальной настройки оптических функций канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время система измерения положения пучка успешно работает на канале Бустер-Нуклотрон комплекса Ника. Она полностью удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

[1] E. Bekhtenev et al. “BPM System for Transport Channel Booster-Nuclotron at NICA Complex”, Physics of Particles and nuclei letters, 2018, Vol.15, No. 7, p. 933-936.
[2] E. Filatov et al. “Transfer channel from Booster to Nuclotron at the NICA facility”, Proceeding of RuPAC-2012, Saint-Petersburg, Russia, p. 322-324.

ДИАГНОСТИКА ПУЧКА В ИНЖЕКЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

Е. Горбачев†, В. Андреев, В. Лебедев, Д. Монахов, С. Романов, Г. Седых, А. Фатеев,

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

Abstract

В Объединённом институте ядерных исследований (Дубна, Россия) создается ускорительный комплекс NICA для проведения экспериментов со сталкивающимися пучками тяжелых йонов. Первая очередь инжекционного комплекса коллайдера NICA состоит из источника тяжелых ионов, линейного ускорителя, нового сверхпроводящего бустерного синхротрона Бустер и сверхпроводящего протонного синхротрона Нуклотрон. В работе описаны системы диагностики пучков синхротронов инжекционного комплекса, представлены результаты их работы в первых сеансах пусконаладочных работ инжекционного комплекса, а также направления их дальнейшего развития.

ВВЕДЕНИЕ

Пучки полностью ободранных тяжелых ионов генерируются и ускоряются в инжекционном комплексе NICA [1], состоящим из источника ионов (КРИОН-6), линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) и двух сверхпроводящих протонных синхротронов: Бустер [2] и Нуклотрон [3]. В будущем, для поддержки программы с поляризованными легкими ионами в ускорительном комплексе будет заменен ускоритель ЛУ-20, который в настоящее время не используется.

Системы диагностики пучка в синхротронах Бустер и Нуклотрон построены по общему принципу и обеспечивают измерения среднего тока пучка и интенсивности, продольных и поперечных профилей пучка, положения пучка, а также измерение частот бетатронных колебаний.

Синхронизация диагностической аппаратуры с характерными точками рабочего цикла ускорителей (начало цикла, инжекция пучка, охлаждение, вывод пучка и др.) обеспечивается системой синхронизации на основе устройств MRF, разработанной и поставленной компанией Cosylab Siberia [4].

Программное обеспечение систем диагностики разработано на базе фреймворка TANGO controls [5] и интегрировано в систему управления ускорительного комплекса NICA [6].

ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕГО ТОКА ПУЧКА

Система измерения среднего тока пучка основана на использовании параметрического трансформатора тока (New Parametric Current Transformer, NPCT) производства фирмы Bergoz Instrumentation [7]. Интенсивность пучка в зарядах или единицах ионов может быть получена пересчетом из измеренного тока с учетом частоты обращения пучка [8].

На рисунке ниже представлена интенсивность пучка ${}_{124}Xe^{54+}$ в Нуклотроне в четвертом сеансе пуско-наладочных работ в начале 2023 года.

Рисунок 1: Типичная интенсивность пучка (желтая линия) и магнитное поле (зеленая линия) в Нуклотроне в течении цикла ускорения и медленного вывода.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ПУЧКА

Продольные профили пучка измеряются при помощи быстрого трансформатора тока (Fast Current Transformer, FCT) производства фирмы Bergoz Instrumentation [9] с полосой пропускания до 1.5 ГГц с последующей оцифровкой сигнала перепрограммируемыми дигитайзерами NI PXIe-5170R [10] с частотой оцифровки до 250 МГц. Одновременно с сигналом FCT оцифровывается также задающий сигнал ВЧ. Общий объем памяти (1.5 ГБ на четыре канала) дигитайзера не позволяет сохранять информацию в течении всего цикла (более 4с), поэтому сбор данных производится окнами с заданной длиной и задержкой относительно момента инжекции пучка. Конфигурацию дигитайзеров и получение данных обеспечивает TANGO устройство, исполняемые на контроллере в шасси, где установлены платы дигитайзера. Для доступа к большому объему данных, набранных за время цикла, разработаны дополнительные TANGO устройства, которые кешируют данные измерений и затем отдают их пользователям по требованию.

Для измерения поперечных профилей используются ионизационные профилометры на основе микроканальных пластин [11], установленные в обоих синхротронах.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Аппаратура

Эллиптические разрезные пикапы (diagonal-cut BPM) используются в качестве позиционно-чувствительных датчиков. Бустер и Нуклотрон имеют по 24

† egorbe@jinr.ru

[1] КРИОН- 6 использовался в последнем 4-м ПНР сеансе, и будет использоваться в тяжело-ионной программе в будущем. В предыдущих 3-х сеансах использовался лазерный источник.

пикапа, которые располагаются в блоках линз и имеют по две пары пластин для измерения вертикального и горизонтального положения пучка. Для сохранения чувствительности пикапа необходимо вывести сигналы с пластин через изоляционный вакуумный объем с минимальной паразитной емкостью на землю. Для этого выводы пикапов соединены с разъемами на корпусе ускорителя при помощи самодельных коаксиальных кабелей с низкой погонной емкостью и минимальной длиной, около 60 см. Положения пикапов относительно магнитной оси линз были отъюстированы на стенде с точностью 0.1 мм.

Четырехканальные согласующие предусилители с высокоомными входами установлены непосредственно на разъемах на корпусе ускорителя (Рисунок 2) для уменьшения длины несогласованного коаксиального кабеля.

Рисунок 2: Предусилитель, установленный на корпусе Бустера.

Усиленные сигналы затем поступают на входы широкополосного усилителя Amplifier 110 (Instrumentation Technologies, Словения) [12], с полосой до 55 МГц, коэффициент усиления которого переключается удаленно через протокол SPI в одиннадцати диапазонах от -50 до +60 дБ, с максимальным временем переключения 1 мкс. Таким образом, переключением коэффициента усиления достигается оптимальная амплитуда входного сигнала для АЦП считывающей электроники не зависимо от интенсивности ускоряемого пучка.

После основного усиления, сигналы поступают на входы аппаратуры Libera Hadron (Instrumentation Technologies, Словения) [13], которая производит оцифровку сигналов и, затем, вычисление положения пучка по вертикали и горизонтали (см. Таблицу 1). Все коммуникации ВЧ сигналов сделаны при помощи коаксиальных кабелей с двойным экраном RG-223 для уменьшения наводок от внешних устройств и выровнены по длине для соблюдения одинаковых задержек сигналов.

Устройство Libera Hadron представляет собой шасси MTCA с четырьмя четырехканальными модулями обработки сигналов, системным контроллером, а также модулями синхронизации и обмена данных. Основные параметры устройства приведены ниже.

Таблица 1: Характеристики Libera Hadron

Параметр	Значение
Количество каналов	16 (4 на модуль)
Разрешение АЦП	16 бит
Частота оцифровки	250 МГц
Размер памяти на модуль	4 ГБ
Точность вычисления	<1 мкм rms

Libera Hadron позволяет получать измеренные данные в нескольких видах:

- Положение, заряд и метка времени каждого сгустка (bunch-by-bunch): используется для диагностики первых оборотов после инжекции;
- Усредненное положение пучка за заданное количество сгустков: используется для отображения орбиты пучка в течение всего цикла ускорения;
- Поток усредненных данных положения пучка с частотой 10Hz: используется для системы коррекции орбиты.

Общее количество используемой аппаратуры в системе измерения положения пучка Бустера:

- 24 четырехканальных предусилителя,
- 24 усилителя Amplifier 110,
- 8 устройств Libera Hadron.

Перед сеансом пусконаладочных работ №4 инжекционного комплекса (22.09.2022 – 03.02.2023), существующая на тот момент система измерения положения пучка Нуклотрона была заменена на систему, полностью идентичную системе Бустера, для которой были дополнительно использованы 24 комплекта усилителей и 6 устройств Libera Hadron.

Программное обеспечение

Контроллер Libera Hadron работает под управлением Linux, в котором исполняется программный модуль (TANGO device server), разработанный производителем, который реализует четыре TANGO-устройства нижнего уровня, предоставляющие полный доступ к регистрам модулей обработки сигналов в виде TANGO атрибутов. Поскольку количество атрибутов этих устройств очень велико, для удобства работы были разработаны дополнительные TANGO-устройства, предлагающие ограниченный функционал по отдельным, не связанным задачам:

- настройка алгоритма измерений,
- получение измеренных данных,
- управление усилителем Amplifier 110,
- мониторинг температур и напряжений модулей устройства.

TANGO-устройства сбора данных также выполняют кеширующие функции путем копирования данных из контроллеров устройств Liber Hadron через сеть TCP/IP в виртуальные машины вычислительного кластера, существенно снимая нагрузку с системного контроллера модуля Libera Hadron и позволяя более эффективно передавать данные клиентским приложениям.

На рисунках 3 и 4 приведены окна клиентского веб-приложения, отображающие сырые данные буфера АЦП и вычисленные положения первых 32 оборотов после инжекции сгустка Fe^{14+} в Бустер.

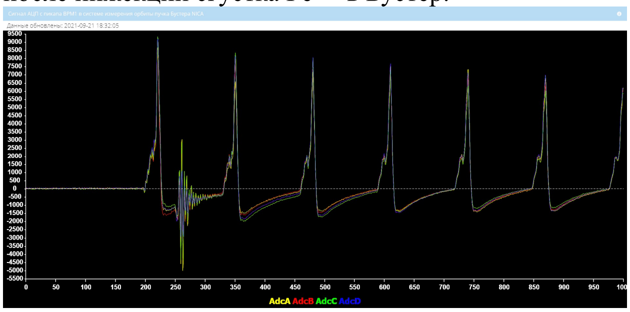


Рисунок 3: Сырые данные буфера АЦП пикапа №1: сигналы с 4 пластин пикапа при инжекции в Бустер Fe^{14+}

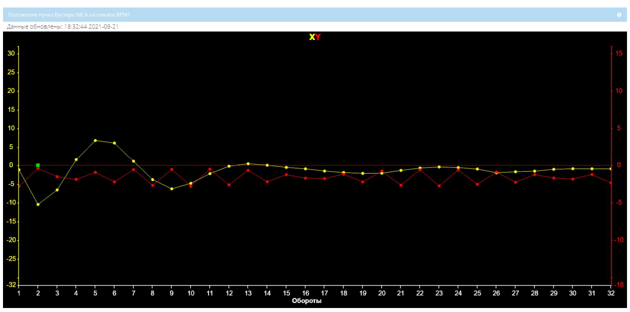


Рисунок 4: Вычисленное горизонтальное (желтая линия) и вертикальное (красная линия) положение сгустка пикапом №1 при инжекции в Бустер Fe^{14+}

Алгоритмы вычисления положения пучка

Для определения положения пучка в одной из плоскостей, необходимо вычислить отношение разницы сигналов пластин к сумме сигналов за определенный период времени, например в течении длительности сгустка (“bunch-by-bunch”), один (“turn-by-turn”) или несколько оборотов.

$$x(t) = \frac{1}{S_x}\frac{S_R(t) - S_L(t)}{S_R(t) + S_L(t)} = \frac{1}{S_x}\frac{\Delta(t)}{\Sigma(t)} \qquad (1)$$

В формуле (1) S_R и S_L обозначают сигналы с правой и левой пластин, которыми могут быть различные величины, набранные за интересующий период времени: пиковые значения сигналов, интегралы сигналов после восстановления базовой линии, интегралы от модулей сигналов, корень из суммы квадратов значений сигналов (root-sum-square, RSS), амплитуды на частоте ВЧ из спектров разностного и суммового сигнала (узкополосный алгоритм) [14]. Значение отношения разности к сумме переводится в значение отклонения пучка при помощи коэффициента чувствительности S_X.

Libera Hadron реализует два алгоритма вычисления: root-sum-square (RSS) для определения положения каждого сгустка и узкополосный алгоритм для определения положения за некоторый период времени. Узкополосный алгоритм обладает высокой чувствительностью и может обеспечивать хорошую точность вычисления положения даже при низкой интенсивности пучка, что было использовано в сеансе ПНР №4, когда интенсивность инжектированного в Бустер пучка Xe^{28+} составляла около $5{\cdot}10^7$ ионов (Рисунок 5).

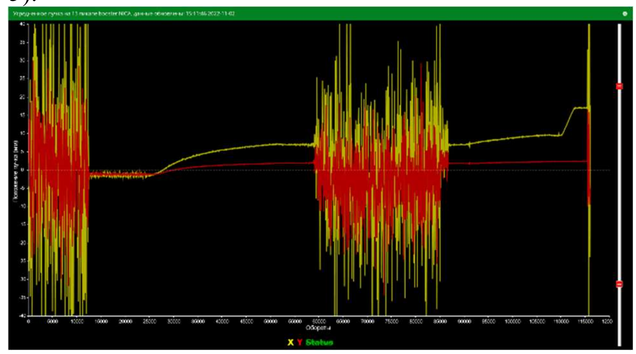


Рисунок 5: Горизонтальное (желтая линия) и вертикальное (красная линия) отклонения пучка, вычисленные узкополосным алгоритмом в течении цикла ускорения $_{124}Xe^{28+}$ в Бустере. Области с шумовым заполнением соответствуют измерениям разгруппированного пучка.

В тоже время, были замечены большие ошибки в измерениях положения пучка узкополосным методом в Нуклотроне на пикапах, расположенных вблизи ускоряющих станций. Ошибки были вызваны высоким уровнем помех на частоте ВЧ (подобные наводки отсутствуют на Бустере, видимо, из-за другой конструкции ускоряющих резонаторов). Алгоритм RSS так же давал большие ошибки из-за низкой интенсивности пучка $_{124}Xe^{28+}$ в Нуклотроне (включение системы электронного охлаждения в Бустере существенно увеличивала интенсивность и укорачивала длительность сгустка в Нуклотроне и, соответственно, увеличивала пиковый ток и точность измерения).

Более точные измерения в Нуклотроне в этих условиях удалось получить с помощью офлайн обработки сырых данных АЦП при помощи альтернативного способа вычисления положения пучка - метода наименьших квадратов.

Различные варианты метода наименьших квадратов для измерения положения пучка подробно описаны в [15]. В основе метода лежит линейная аппроксимация зависимости разности сигналов пластин пикапа Δ_i от суммы сигналов пластин Σ_i (где i – номер выборки). Сигналы набираются за определенное время, например за время длительности сгустка. Два наиболее простых варианта зависимости - пропорция (формула (2)) и прямая линия (формула (3)). В обоих случаях, наклон прямой линии $\langle m \rangle$ является оценкой относительного положения пучка $\alpha = x/r$ (r-радиус пикапа).

$$\Delta = \langle m \rangle \Sigma, \qquad \langle m \rangle = \frac{\langle x \rangle}{r} = \frac{\overline{\Delta \cdot \Sigma}}{\overline{\Sigma^2}} \qquad (2)$$

$$\Delta = \langle m \rangle \Sigma + c, \quad \langle m \rangle = \frac{\langle x \rangle}{r} = \frac{cov(\Delta,\Sigma)}{\sigma_\Sigma^2} \qquad (3)$$

Так же, как и алгоритме RSS, метод наименьших квадратов не требует восстановления базовой линии, что существенно упрощает реализацию алгоритма вычисления положения пучка и время его выполнения. Дополнительно к этому, аппроксимация прямой линией (формула (3)) обладает иммунитетом к смещениям АЦП и низкочастотным (по сравнению с длиной сгустка) помехам.

Сравнение эффективности различных алгоритмов вычисления положения было проведено при помощи симуляции в GNU Octave [16]. В симуляции сравнивались алгоритмы root-sum-square (RSS) и несколько модификаций метода наименьших квадратов: пропорциональный (Proportion), аппроксимация прямой линией (ordinary linear square, OLS) и улучшенный метод total linear square (TLS), предложенный и описанный в [17]. В качестве входных данных генерировались массивы оцифрованных данных с пластин пикапа, соответствующие отклонению на 5мм в диагонально-разрезном пикапе с радиусом камеры 50мм. Затем к сгенерированным сигналам добавлялся белый шум с заданным отношением среднеквадратичного значения амплитуды шума к среднеквадратичному значению амплитуды половины суммы сигнала.

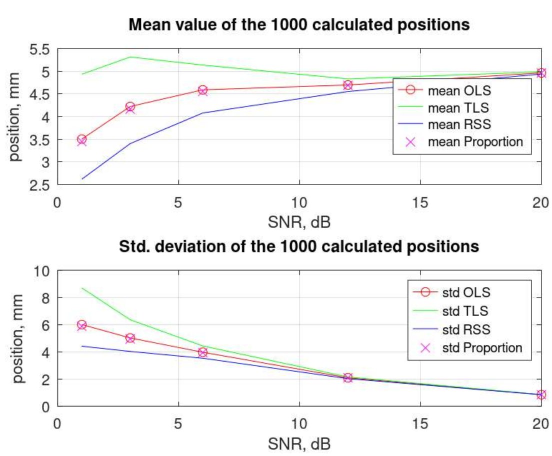


Рисунок 6: Сравнение точностей вычисления положения пучка в зависимости от соотношения сигнал/шум при номинальном отклонении 5 мм

Симуляция (см. Рисунок 6) показала, что все варианты метода наименьших квадратов дают более точную оценку положения пучка в условиях сильных помех, чем алгоритм RSS, используемый в Libera Hadron. При уменьшении уровня шумов (SNR>20 dB), все сравниваемые алгоритмы показывали хорошую точность. Дополнительно была проведена симуляция добавления смещения на одну из пластин, в результате которой была выявлена полная иммунность алгоритмов OLS и TLS и сильная зависимость алгоритмов RSS и пропорционального варианта метода наименьших квадратов к смещению на одной из пластин.

Реализация алгоритма OLS в ПЛИС

Для получения возможности использовать метод наименьших квадратов в режиме онлайн, было решено разработать универсальный программный модуль для FPGA, реализующий алгоритм OLS для параметров пучков Бустера, Нуклотрона и коллайдера NICA. Алгоритм хорошо себя зарекомендовал в офлайн обработке сырых данных с пикапов Нуклотрона и существенно проще в реализации, чем алгоритм TLS, обладая при этом рядом преимуществ по сравнению с алгоритмом RSS, используемым в Libera Hadron. Технические требования к программе вычисления:

- Частота оцифровки: 250 МГц;
- Разрешение АЦП: 16 бит;
- Формат измеренных данных: 16-битные целые числа со знаком в формате 2's complement;
- Максимальная длина сгустка: 10 мкс (2500 тактов АЦП), соответствует инжекции в Бустер;
- Минимальная длина сгустка: 77 нс (19 тактов АЦП), соответствует режиму столкновений в коллайдере;
- Точность вычисления: лучше 10 мкм.

Алгоритм был реализован в программе на языке VHDL без использования программных модулей (IP-core) производителей ПЛИС и может использоваться в любой ПЛИС с достаточными ресурсами.

Реализация представляет собой автомат состояний (state machine), который выполняется на частоте АЦП (250 МГц). В процессе его работы, каждый такт вычисляется разность и сумма оцифрованных сигналов с противоположных электродов (формула (4)), в течении цикла ВЧ накапливаются четыре суммы ($\sum_{i=1}^{N}\Sigma_i, \sum_{i=1}^{N}\Delta_i, \sum_{i=1}^{N}(\Delta_i\cdot\Sigma_i), \sum_{i=1}^{N}\Sigma_i^2$) и, после завершения цикла ВЧ, вычисляется относительное отклонение α по формуле (5) параллельно с накоплением данных следующего сгустка.

$$\Delta_i = A_i - C_i,\ \Sigma_i = A_i - C_i \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{N\cdot\sum_{i=1}^{N}(\Delta_i\cdot\Sigma_i) - \sum_{i=1}^{N}\Delta_i\cdot\sum_{i=1}^{N}\Sigma_i}{N\cdot\sum_{i=1}^{N}\Sigma_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{N}\Sigma_i\right)^2} = \frac{A_1 - A_2}{A_3 - A_4} \tag{5}$$

Рост разрядности переменных в процессе арифметических операций и накопления сумм приводит к тому, что вычисление α требует деления двух 58-битных чисел со знаком, выполнение которого должно занимать не более 19 тактов (частота следования сгустков в коллайдере). При использовании формата числа с фиксированной запятой (формат представления вещественного числа в виде целого числа), ширина результата деления состоит из ширины целой части, ширины дробной части и 1 бита на знак. Учитывая факт, что |α| <1, целая часть всегда равна 0 и можно использовать 16-битное число с фиксированной запятой со знаком и 15 битами дробной части. Относительная точность вычисления при этом составляет 2^{-15}, что для радиуса камеры пикапа 50 мм эквивалентно 1.5 мкм.

Для реализации операции деления был использован алгоритм не восстанавливающего деления (non-restoring algorithm) [18], который позволил получить результат за 18 тактов с максимальной тактовой частотой 320 МГц для ПЛИС Xilinx Kintex-7 speed grade -2.

Для сравнения, предоставляемая производителем реализация Xilinx Divider Generator 5.1 позволяет получить тот же результат за 78 тактов с максимальной тактовой частотой 117 МГц при гораздо большем потреблении ресурсов ПЛИС.

Кроме оптимизации деления, были оптимизированы операции умножения длинных чисел при помощи разбиения их на несколько операций умножения с меньшей шириной множителей, что позволило эффективно использовать встроенные в ПЛИС Xilinx блоки цифровой обработки сигналов (DSP blocks) шириной 25x18 бит.

Полная программа вычисления положения пучка была функциональна верифицирована при помощи GHDL [19] - свободного симулятора для языка VHDL. Процесс верификации заключался в генерации потока данных АЦП при помощи программы в GNU Octave для различных отклонений пучка от -50 мм до 50 мм, вычисление положения при помощи разработанного модуля для ПЛИС и сравнение результатов его вычислений на разных этапах алгоритма с результатами аналогичных вычислений в реализации алгоритма в GNU Octave. Максимальная частота выполнения алгоритма в ПЛИС Xilinx Kintex-7 speed grade -2 составила 265МГц, что превышает требуемую частоту.

Также была реализована модификация алгоритма, работающая на половине частоты АЦП и получающая по 2 точки измерений за такт, для использования в перепрограммируемых осциллографах NI [20].

Таким образом, потенциально алгоритм можно использовать как пользовательский алгоритм в Libera Hadron, что потребует некоторых доработок для совместимости с программным и аппаратным обеспечением прибора. Помимо этого, алгоритм может быть применен в 4-х или 8-ми канальных 14-битных перепрограммируемых осциллографах NI PXIe-5164/5170/5171, а также в 4-х канальных 16-битных FlexRIO осциллографах PXIe-5763/5764 с частотой оцифровки до 1ГГц, как альтернативной платформы для реализации системы вычисления положения пучка.

ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА

Система измерения частот бетатронных колебаний использует раскачку пучка для возбуждения когерентных колебаний, измеряет сигнал положения пучка на пикапе и извлекает информацию о его спектре при помощи преобразования Фурье от накопленных за множество (256, 512, 1024) оборотов измерений.

Для раскачки пучка используется кикер, запитанный через повышающий трансформатор от мощного широкополосного усилителя AR 800A3 [21]. Сигнал раскачки генерируется цифровым образом в ПЛИС модуля NI PXIe-7975, при этом возможны несколько вариантов раскачки:

- Единичный удар по сгустку;
- Белый шум полосой от 10 кГц до 3МГц;
- Когерентный шум (случайные удары по сгустку в целом);
- Сканирование частоты в заданном диапазоне.

Система была успешно использована [22] для измерения дробной части частоты бетатронных колебаний в сеансе ПНР №2, при ускорении в Бустере ионов Fe^{14+} до энергии 200 MeV/n (см. Рисунок 7).

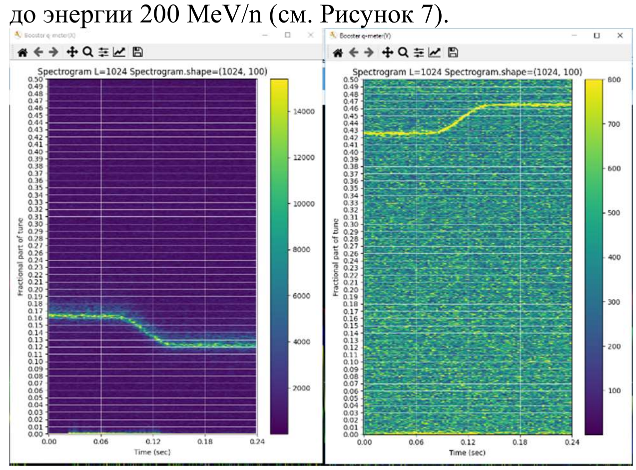


Рисунок 7: Измерение дробной части частот бетатронных колебаний в Бустере при плавном изменении токов в линзах

Максимальная амплитуда удара текущей системы составляет 1200В, что недостаточно для раскачки пучков с более высокими энергиями (например, в Нуклотроне). В настоящее время разработана высоковольтная система с возбуждением пучка единичным ударом амплитудой до 50 кВ, которая позволит проводить измерения как на полке магнитного поля так и в течении цикла ускорения. Принцип работы системы:

- Одновременная зарядка пластин кикера за время 100 мс от высоковольтного источника питания. Величина напряжения источника устанавливается в зависимости от текущей энергии пучка;
- Индивидуальная разрядка пластин при помощи тиратронов. Длительность ударного импульса регулируется изменением времени задержки между запусками тиратронов (см Рисунок 8);
- И амплитуда, и ширина ударного импульса изменяются в процессе ускорения;
- Расчетное отклонение пучка: около 2 мм во всем диапазоне энергий пучка бустера.

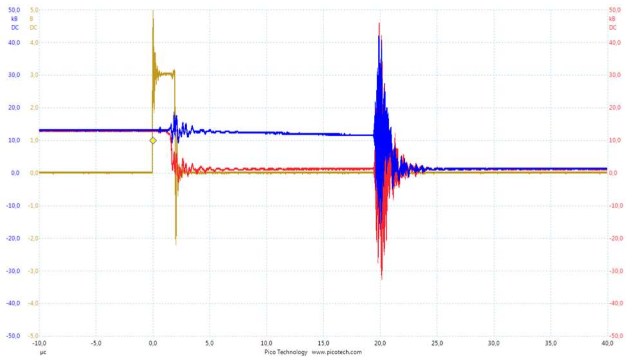


Рисунок 8: Срабатывание кикера раскачки пучка. Импульс начала удара (желтая линия), напряжения на пластинах кикера (синяя и красная линия) с делителей 10000:1

Программная реализация представляет собой TANGO устройство, которое следит за конфигурацией цикла магнитного поля ускорителя. При каждом его изменении, устройство вычисляет время оборота частиц и необходимую амплитуду удара для каждого заданного момента срабатывания кикера в течение цикла ускорителя. В соответствие с этими вычислениями, устройство обновляет время событий срабатывания ключей в системе синхронизации, а также программирует генератор функции, который задает амплитуду выходного напряжения ВВ источника.

Система была испытана на Бустере в сеансе ПНР №4 и показала успешную работу вплоть до амплитуды 20 кВ. При больших напряжениях были замечены ложные срабатывания ключей из-за наводок по цепям запуска тиратронов. В настоящее время проводятся работы по устранению замеченных недостатков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система диагностики пучков синхротронов Бустер и Нуклотрон инжекционного комплекса NICA была разработана и испытана в сеансах пуско-наладочных работ. По итогам сеансов, предложены варианты улучшения работы системы измерения положения при низких интенсивностях пучка, а также модификация системы измерения бетатронных частот для работы в большем диапазоне энергий и возможностью проведения измерений в процессе ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] A.V. Butenko et al, Injection complex development for the NICA project, proceedings of 29th Linear Accelerator Conference (LINAC2018), Beijing, China, 2018, pp. 663-665

[2] A.V. Butenko et al., NICA Booster: a new-generation superconducting synchrotron, Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 2023, pp. 195-212.

[3] A. Sidorin et al, Status of the Nuclotron, proceedings of 26th Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2018), Protvino, Russia, 2018, pp. 49-51

[4] G. Fatkin at al, Инфраструктура и программное обеспечение системы синхронизации и задающего ВЧ для Комплекса НИКА, presented at RuPAC'23, Novosibirsk, Russia, September 2023, paper 309, this conference.

[5] https://www.tango-controls.org

[6] G. Sedykh et al, Система управления инжекционного комплекса NICA, presented at RuPAC'23, Novosibirsk, Russia, September 2023, paper 312, this conference.

[7] https://www.bergoz.com/products/npct

[8] V. Andreev et al, The subsystem of the internal beam intensity diagnostics at the Nuclotron, Proceedings of the XXVI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017), Becici, Budva, Montenegro, September 25 - 29, 2017, pp. 345-350

[9] https://www.bergoz.com/products/fct

[10] https://www.ni.com/ru-ru/shop/model/pxie-5170.html

[11] A.A. Baldin at al, Nondestructive diagnostics of accelerated ion beams with mcp-based detectors at the accelerator complex NICA. experimental results and prospects, proceedings of 27h Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC2021), Russia, 2021, pp. 82-84

[12] https://www.i-tech.si/products/amplifier-110

[13] https://www.i-tech.si/products/libera-hadron

[14] A. Reiter, R. Singh, Comparison of beam position calculation methods for application in digital acquisition systems, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 890 (2018), pp. 18–27

[15] A. Reiter, R. Singh, O. Chorniy, Statistical Treatment of Beam Position Monitor Data, 2016, arXiv:1609.01332.8

[16] https://octave.org

[17] Xiaojuan Wei, Min Li at al. An improved method of bunch-by-bunch beam position calculation in a heavy-ion synchrotron, 2022. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022)

[18] Jean-Pierre Deschamps, Gustavo D. Sutter, Enrique Cantó, Guide to FPGA Implementation of Arithmetic Functions. Springer, 2014

[19] http://ghdl.free.fr

[20] http://www.ni.com/white-paper/52320/en

[21] https://arworld.us/product/800a3b

[22] М.М. Шандов et al, Исследование характеристик магнитной структуры Бустера NICA в ПНР с пучком в 2020-2022гг., Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249), pp 969–983

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА В ИНЖЕКТОРЕ КОМПЛЕКСА СКИФ

Е.А. Бехтенев[1,2], Г.В. Карпов[1*]
1 Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия
2 Новосибирский государственный университет

Аннотация

Система измерения положения пучка, разработанная и изготовленная в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера для Инжектора комплекса СКИФ, обеспечивает измерения поперечных координат пучка на всем его пути, начиная с Линейного ускорителя до выпуска из Бустера. Система включает в себя 15 датчиков положения пучка (пикапов) полоскового типа в Линейном ускорителе (Линаке) и канале Линак-Бустер, 38 пикапов “пятакового” типа в Бустере и электронику. Электроника основана на использовании калибровочного сигнала в промежутках времени, когда отсутствует пучок. В блоках электроники реализована собственная стабилизация температуры, что снижает требования к стабильности температуры внутри стоек. Электроника пикапов обеспечивает точность измерений порядка 10 мкм как для однопролетных измерений положения пучка в Линаке и канале Линак-Бустер, так и для измерений положения пучка в Бустере. Разработанное программное обеспечение на основе EPICS работает внутри блоков электроники пикапов.

ВВЕДЕНИЕ

Инжектор для источника СИ 4-го поколения СКИФ разрабатывается и изготавливается сейчас в Институте Ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия [1]. Инжектор включает в себя Линейный ускоритель (Линак), бустерный синхротрон (Бустер) и канал Линак-Бустер. Основные параметры Бустера приведены в Таблице 1.

Таблица 1: Основные параметры Инжектора

Энергия выпуска пучка из Линака	200 МэВ
Энергия выпуска пучка из Бустера	3 ГэВ
Количество сгустков в пучке	80
Интервал времени между сгустками	5.6 нс
Номинальный заряд пучка в сгустке	0.45 нКл
Цикл работы Инжектора	1 Гц
Частота обращения Бустера F_0	1.888 МГц
Частота ВЧ Бустера	356.98 МГц
Средний ток пучка Бустера	1-50 мА
Время подъема энергии в Бустере	400 мс

Система измерения положения пучка в Инжекторе должна обеспечивать однопролетные измерения в Линаке и канале Линак-Бустер, а также измерения в Бустере с точностью не хуже 20 мкм. В Бустере система должна обеспечивать измерения первого оборота с точностью порядка 50 мкм, пооборотные измерения с разрешением 20-30 мкм, а также измерения с частотой 10 кГц с точностью порядка 10 мкм.

Система измерения положения пучка, удовлетворяющая этим требованиям, была разработана и изготовлена в ИЯФ им. Г.И.Будкера. Система включает в себя 15 датчиков положения пучка (пикапов) полоскового типа в Линейном ускорителе (Линаке) и канале Линак-Бустер, 38 пикапов “пятакового” типа в Бустере и электронику. Были разработаны универсальные блоки электроники способные работать как в Линаке и канале, так и в Бустере.

Электроника пикапов основана на использовании калибровочного сигнала в промежутках времени, когда отсутствует пучок. В Линаке и канале сразу после пролета пучка на фиксированное время 10-20 мс подается калибровочный сигнал – синусоидальное напряжение с частотой ВЧ Бустера 356.98 МГц. В Бустере калибровочный сигнал той же частоты подается сразу после выпуска пучка.

ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА

Чертеж датчика положения пучка полоскового типа представлен на Рис. 1.

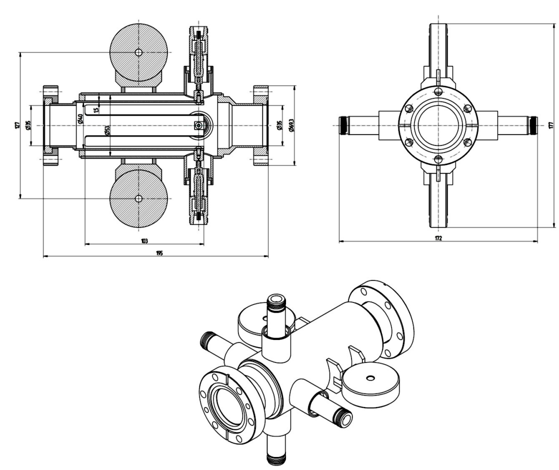


Рис.1. Датчик положения пучка полоскового типа.

Пикап содержит 4 полосковых электрода с волновым сопротивлением 50 Ом длиной 110 мм, расположенных под углом 45° к горизонтальной плоскости. Один конец каждого электрода закорочен на корпус, другой соединен с 50 Ω/450°С вакуумным вводом с разъемом N-типа. Геометрический фактор $G_{X,Y}$ пикапа около 14 мм для обоих координат.

Датчики положения пучка пятакового типа для Бустера изготовлены в двух модификациях: с внутренней апертурой 41×24 мм и 62×22 мм. Фото одного из таких датчиков представлено на Рис. 2.

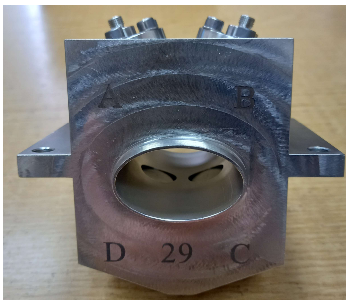


Рис.2. Датчик положения пучка пятакового типа.

Электродами данных пикапов являются пятаки диаметром 15 мм. Каждый электрод соединен с 50 Ω/450°С вакуумным вводом с разъемом типа SMA. Напряжение гармоники 356.98 МГц на электродах пикапа в милливольтах при прохождении пучка по центру можно оценить по экспериментально полученной формуле: $U_Э = 0.48 \times I_П$, где $I_П$ – средний ток пучка в Бустере в миллиамперах.

ЭЛЕКТРОНИКА ПИКАПОВ

Функциональная схема электроники пикапов приведена на Рис.3.

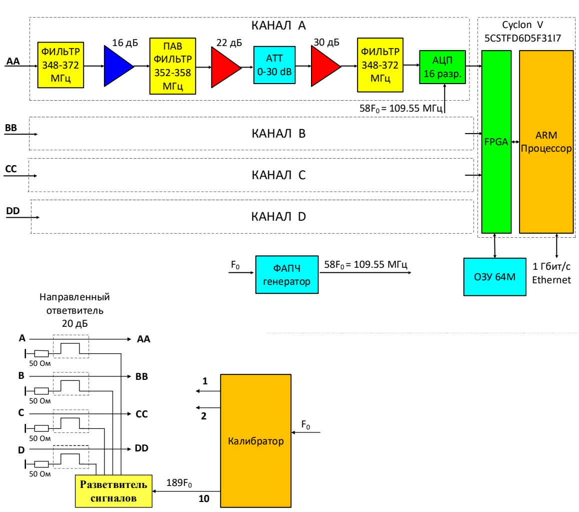


Рис.3. Функциональная схема электроники пикапов.

Электроника пикапов включает в себя основной блок обработки сигналов пикапа “BPM Processor”, Калибратор и переходную коробку “Junction Box”.

Блок “BPM Processor” содержит 4 одинаковых канала аналоговой обработки сигналов (*A, B, C, D*). Для измерений используется первая гармоника частоты ВЧ Бустера $189f_0$ (356.98 MHz), которая выделяется из спектра сигнала с помощью полосовых ПАВ фильтров с полосой ~6 МГц. Каждый канал аналоговой обработки сигналов обеспечивает программную регулировку усиления в диапазоне 0-30 дБ с шагом 1 дБ, что обеспечивает оптимальную работу блока в широком диапазоне тока пучка.

Сигналы преобразуются в цифровой вид с помощью 16-разрядного АЦП с частотой выборок $f_{АЦП} = 58f_0 \approx 109.55$ МГц. Частота выборок АЦП генерируется малошумящим PLL генератором с фазовым шумом не более 0.5 пс в полосе ~2 МГц. Оцифрованные сигналы поступают в ПЛИС (FPGA) Cyclon-V 5CSTFD6D5F31I7, где выполняется их окончательная обработка. Из-за свертки частот частота сигнала на входе ПЛИС будет равна $15f_0$. Блок пикапной электроники выдает 3 типа данных:

1) данные АЦП – осциллограмма с частотой 109.55 МГц, длина – 16К (16384) точек;
2) массив пооборотных измерений (для Бустера) емкостью около 12 млн. оборотов;
3) массив измерений с частотой ~10кГц (для Бустера) емкостью 8К (8192) точек.

Чип 5CSTFD6D5F31I7 помимо ПЛИС содержит ARM процессор, в котором работает операционная система Linux. В данном процессоре работает Epics IOC, которая управляет блоком на нижнем уровне и обеспечивает связь через Ethernet интерфейс 1 Гб/сек с системой управления комплекса СКИФ.

Рис.4. Блок “BPM Processor”.

Блок “BPM Processor” размещен в корпусе 1U евромеханики шириной 19 дюймов (Рис.4). В блоке реализована внутренняя стабилизация температуры аналоговой части. Аналоговая часть размещена в отдельном алюминиевом корпусе (Рис.4 сверху). К боковым поверхностям корпуса прикреплены 2 нагревателя с регулируемой мощностью нагрева в диапазоне 0-2 Вт для каждого нагревателя, что обеспечивает диапазон регулировки температуры в пределах ~10 градусов. Температура измеряется с помощью двух датчиков, один из которых расположен внутри корпуса, другой прикреплен к поверхности корпуса. Стабилизация температуры осуществляется с помощью ПИД регулятора, реализованного на уровне Epics IOC в ARM процессоре чипа 5CSTFD6D5F31I7. Долговременная стабильность температуры обеспечивается на уровне ±0.1˚C.

В промежутки времени, когда отсутствуют сигналы от пучка, на фиксированное время T_{CAL} = 10-20 мс из отдельного блока Калибратора на 4 входа блока “BPM Processor” через переходную коробку “Junction Box” поступает калибровочный сигнал – синусоидальное напряжение с частотой ВЧ Бустера 189f_0 (356.98 MHz). Калибровочный сигнал подается через разветвитель сигналов 1:4 на 4 направленных ответвителя с коэффициентом передачи -20 дБ, содержащихся в переходной коробке. Переходная коробка “Junction Box” находится около пикапа и соединяется с его электродами короткими (длиной 1 м) кабелями. Амплитуда выходного напряжения Калибратора регулируется в диапазоне 0-1 В – в зависимости от установленного коэффициента передачи аналоговых каналов блока “BPM Processor”. Использование калибровочного сигнала той же частоты, что и основной сигнал с пикапа позволяет существенно уменьшить погрешность измерений, вызванную нестабильностью коэффициентов передачи аналоговых каналов.

Блок “BPM Processor” содержит 4 оптических SFP приемопередатчика, позволяющих передавать и получать данные с темпом до 3 Гбит/сек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ПИКАПОВ НА ПРОТОТИПЕ ЛИНАКА И ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

В 2023г в ИЯФ прошли испытания прототипа Линака (части Линака), который включал в себя 3 пикапа. На этих трех пикапах была испытана пикапная электроника. На Рис. 5 показаны осциллограммы сигналов на выходах 4-х каналов блока “BPM Processor” от одиночного сгустка. На Рис. 6 показаны огибающие суммы сигналов с 4-х выходов каналов блока “BPM Processor” при разных длительностях пучка – разных количествах сгустков с интервалом 5.6 нс (от одного до 55 сгустков). Обработка сигнала включала в себя выделение временного “окна” и синхронное детектирование сигнала в этом “окне” на частоте 15f_0.

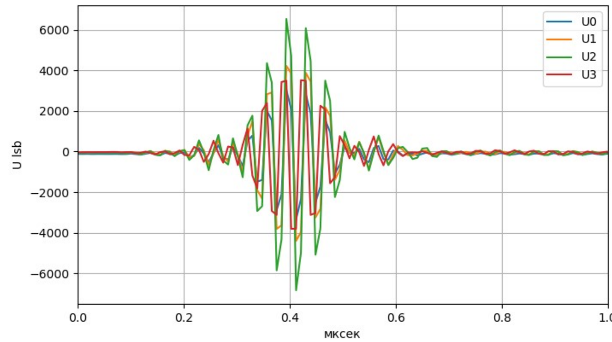


Рис.5. Сигналы на выходах 4-х каналов блока “BPM Processor” от одиночного сгустка.

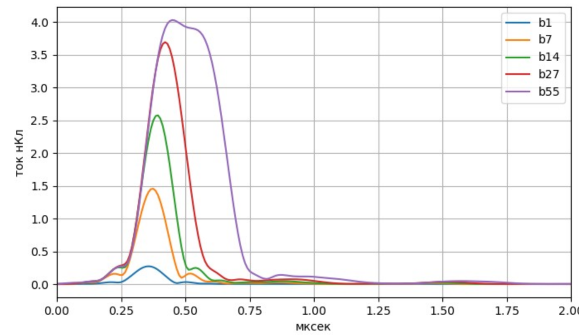


Рис.6. Огибающие суммы сигналов с 4-х выходов каналов блока “BPM Processor” при разных количествах сгустков.

Для нахождения параметров точности измерений положения пучка в лаборатории на стенде была проведена серия измерений. В качестве сигнала с пикапа был использован сигнал генератора, имитирующий сигнал пучка в Линаке и канале Линак-Бустер – кусок синусоидального напряжения частотой 357.9832 МГц, длительностью, примерно равной длительности пучка – 500 нс и амплитудой, соответствующей амплитуде сигнала с пикапа при номинальном заряде пучка. В результате были определены основные параметры, характеризующие точность однопролетных измерений положения пучка: разрешение измерений, зависимость результата от температуры и зависимость результата от заряда пучка.

Зависимость результата измерений от температуры без включения внутренней стабилизации температуры и без использования калибровочного сигнала составляет около 5-8 мкм/˚C. Использование калибровочного сигнала без включения внутренней стабилизации температуры либо включение внутренней стабилизации температуры без использования калибровочного сигнала уменьшают эту зависимость до примерно 1 мкм/˚C. При использовании калибровочного сигнала внутренняя температурная стабилизация практически не дает эффекта. В этом режиме зависимость результата измерений от температуры определяется главным образом нестабильностью коэффициентов передачи разветвителя сигналов и 4-х направленных ответвителей, содержащихся в переходной коробке “Junction Box”. С другой стороны, температурная стабилизация позволяет обойтись и без калибровочного сигнала. Но здесь следует учесть, что использование калибровочного сигнала позволяет минимизировать зависимость результата измерений от установленного коэффициента передач аналоговых каналов 0-30 дБ. Кроме того, использование калибровочного сигнала позволяет устранить влияние нестабильности коэффициентов передач кабелей, соединяющих блок “BPM Processor” с пикапом.

На Рис.7 представлены результаты однопролетных измерений в течение трех суток при включенной температурной стабилизации и использовании калибровочного сигнала.

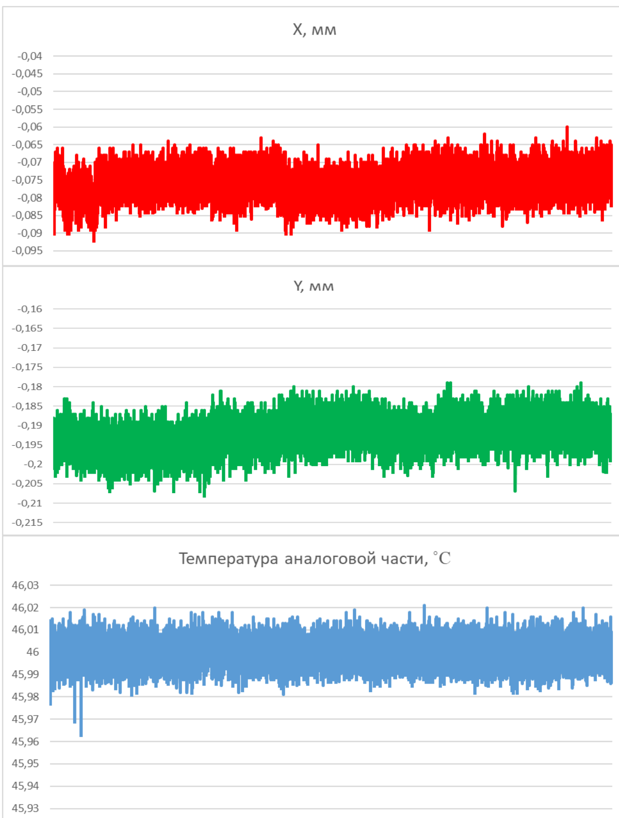


Рис.7. Результаты однопролетных измерений координат X, Y и температуры за трое суток.

Среднеквадратичное отклонение измеренных координат пучка от среднего значения, часто просто называемое разрешением измерений, составляет около 4 мкм для номинального заряда пучка. Медленные уходы измеренных координат составляют около 5-7 мкм (от минимума до максимума). Прежде всего это вызвано температурной нестабильностью коэффициентов передачи разветвителя сигналов 1:4 и 4-х направленных ответвителей внутри переходной коробки “Junction Box”. При этом температура окружающей среды за эти трое суток менялась в пределах 3-4 градусов.

Установка различных коэффициентов передач каналов в диапазоне 0-30 дБ приводит к смещению результата измерения в пределах ±5 мкм. Реально в номинальном режиме работа будет идти при неких фиксированных значениях коэффициентов передач каналов, поэтому данная погрешность не должна проявляться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в ИЯФ система измерения положения пучка в Инжекторе комплекса СКИФ полностью удовлетворяет предъявляемым ей требованиям. Точность однопролетных измерений на уровне нескольких мкм является вполне достаточной для настройки оптимальных параметров Инжектора. В настоящее время система, включая пикапы и электронику, изготовлена. В 2024г. ожидается ее запуск на Инжекторе.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Г. Баранов и др./ Источник синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП “СКИФ” // Алушта-2023

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА NICA

Г.С. Седых[1], Е.В. Горбачев, В.А. Андреев, В.Г. Елкин ОИЯИ, Дубна, Россия

[1]также Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Абстракт

Инжекционный комплекс NICA включает в себя источник тяжелых ионов, линейный ускоритель, канал перевода пучка в Бустер, Бустерный синхротрон, канал перевода в Нуклотрон, Нуклотрон и канал перевода пучка в коллайдер. В докладе описывается система управления инжекционного комплекса NICA, принципы её построения, элементная база, программные технологии и статус готовности.

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA[1] создается на базе Объединенного Института Ядерных Исследований в Дубне для проведения физических экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов. Он состоит из инжекционного комплекса и коллайдера тяжелых ионов. В настоящий момент производится монтаж магнитно-криостатной системы коллайдера. В состав инжекционного комплекса входят источник тяжелых ионов KRION, линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУТИ, бустерный синхротрон, модернизированый синхротрон Нуклотрон и каналы перевода пучка. Система управления инжекционного комплекса состоит из большого количества распределенных по ускорительной установке аппаратных и программных компонентов и предназначена для обеспечения их взаимодействия.

Основные задачи системы управления

Основными задачами системы управления являются:

- Контроль и управление большим количеством аппаратных и программных компонентов, распределенных по ускорительной установке и обеспечение их взаимодействия.
- Возможность быстрой смены режима работы - накопление в коллайдере, работа на выведенную мишень, различные ионы и энергии;
- Обеспечение надежной и безопасной работы установки на протяжении длительного времени.
- Взаимодействие с системами синхронизации и диагностики ускорительного комплекса;
- Наличие удобных механизмов для настройки и управления компонентами системы управления, средств для централизованного мониторинга всех компонентов системы управления, сбора отладочной информации и стандартизированной обработки ошибок;
- Возможность создавать удобные пользовательские интерфейсы.

.

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Распределенные компоненты СУ взаимодействуют друг с другом при помощи сети Ethernet. В качестве связующего протокола используется технология Tango Controls [2] - свободная, кроссплатформенная, устройство-ориентированная среда и набор инструментов для создания распределенных систем управления крупными физическими установками. В пределах системы Tango Controls каждое физическое устройство или логическая сущность в СУ отображается в виде устройства Tango, которое имеет уникальный идентификатор вида: “domain/family/member”. Устройства взаимодействуют друг с другом, а также с клиентскими приложениями, при помощи стандартизированного интерфейса: читают или записывают атрибуты, выполняют команды. Для конфигурации устройств используются свойства. Взаимодействие с устройством может выполняться синхронно, асинхронно или по событиям.

На рисунке 1 представлена трехуровневая структура системы управления:

- Уровень доступа к оборудованию - программные модули, непосредственно управляющие оборудованием.
- Сервисный уровень - высокоуровневые программные модули, осуществляющие реализацию алгоритмов управления подсистемами и взаимодействующих с оборудованием при помощи устройств низшего уровня.
- Клиентский уровень - предоставление операторам удобных средств контроля и управления ускорительным комплексом.

Tango-устройства, не связанные непосредственно с j,оборудованием, выполняются на виртуальных машинах в кластере из 8 серверов Supermicro [3] под управлением системы виртуализации Proxmox [4]. Таким образом, большинство задач, связанных с обработкой, хранением данных и сложными вычислениями, выполняются в высокопроизводительном кластере. Для хранения данных используется система CEPH [5] с трехкратным резервированием информации. Система управления инжекционного комплекса предоставляет необходимые сервисы для настройки и управления устройствами, архивации и получения данных, авторизации и разграничения прав доступа, мониторинга, сбора отладочной информации.

* Седых Г.С. и другие
† E-mail: gsedykh@jinr.ru

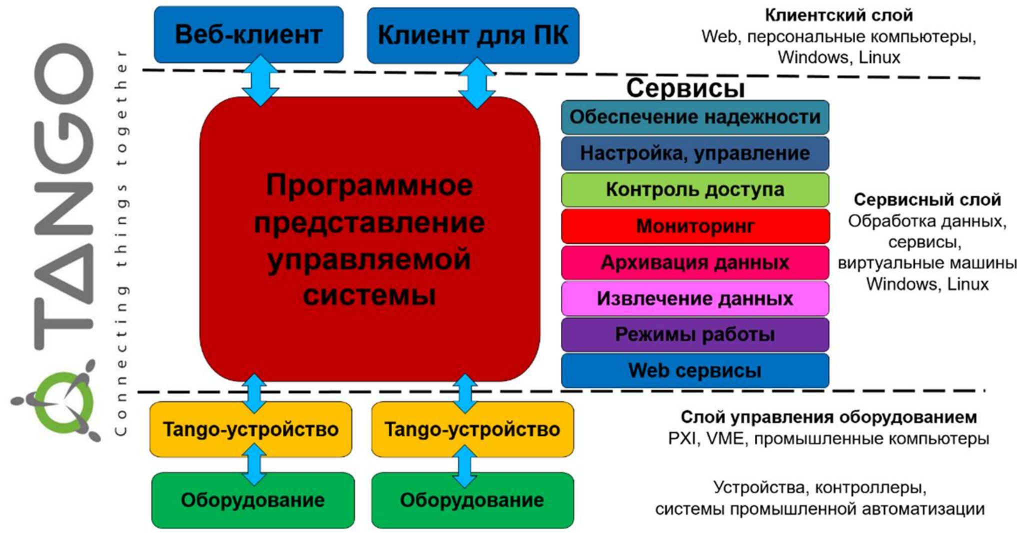


Рисунок 1: Трехуровневая структура системы управления инжекционного комплекса NICA

Уровень управления оборудованием

Основной задачей нижнего уровня является предоставление универсального доступа к устройствам вне зависимости от их расположения, способа подключения к системе и протокола обмена данными. Устройства нижнего уровня выполняются в контроллерах или промышленных компьютерах.

В системе управления и диагностики инжекционного комплекса широко используется оборудование фирмы National Instruments[6] в форматах PXIe, CompactRIO и FlexRIO. Это аналоговые и цифровые входы/выходы, преобразователи промышленных интерфейсов, дигитайзеры и осциллографы, генераторы сигналов и многие другие виды оборудования. Для работы с оборудованием NI были разработаны Tango модули для аналогового и цифрового ввода и вывода, а также модули цифровых осциллографов и генераторов импульсов [7]. Необходимые параметры (количество каналов, частота оцифровки, источник триггера и другие) настраиваются при помощи свойств. Комбинируя нужные модули возможно работать практически с любой платой сбора данных National Instruments.

Источники питания EVPU, используемые в системе коррекции орбиты, управляются по протоколу Profibus. Для управления этими источниками используется класс PSMbus, позволяющий работать с источниками через последовательный порт или Ethernet [8].

Для систем измерения орбиты Бустера и Нуклотрона применяются устройства Libera Hardron, которые включаются в систему управления при помощи Tango-устройств Libera-ds, предоставляемых компанией Instrumentation Technologies [9].

Для связи с промышленными устройствами АЦП/ЦАП и другими по стандартному протоколу Modbus используется Tango-устройство ModbusDS [10]. Оно предоставляет данные из регистров Modbus в виде динамических атрибутов Tango-устройства и осуществляет преобразование типов. Настройка производится при помощи свойств. Поддерживаются протоколы Modbus TCP, RTU, ASCII, RTU over TCP.

Взаимодействие с программируемыми логическими контроллерами удобно осуществлять при помощи OPC сервера. Для соединения с OPC DA серверами используются устройства OPCDADS [11], которые предоставляют переменные OPC в виде динамических атрибутов соответствующего типа. Для работы по современному стандарту OPC UA применяется устройство OPCUADS [12], которое может работать в клиентском и серверном режиме. Оно предоставляет доступ к его переменным через свои атрибуты соответствующего типа. В клиентском режиме устройство подключается к удаленному OPC UA серверу, а в серверном режиме устройство само является OPC UA сервером.

Для работы с самодельным или специализированным оборудованием часто используются текстовые или бинарные протоколы. Для реализации работы по последовательному порту применяется устройство SerialLine [13], а для связи по Ethernet – SocketDS [14].

Сервисный уровень

Сервисный уровень содержит Tango-устройства высокого уровня. Они взаимодействуют с устройствами нижнего уровня, обрабатывают полученную информацию и реализуют алгоритмы управления системами ускорительного комплекса. Как правило модули сервисного уровня выполняются на виртуальных машинах.

Tango-устройство CollectorDS [15] агрегирует атрибуты и команды других устройств и представляет их как свои. Настройка производится при помощи свойств. CollectorDS может использоваться для связи между различными установками Tango и с целью ускорения работы медленных устройств.

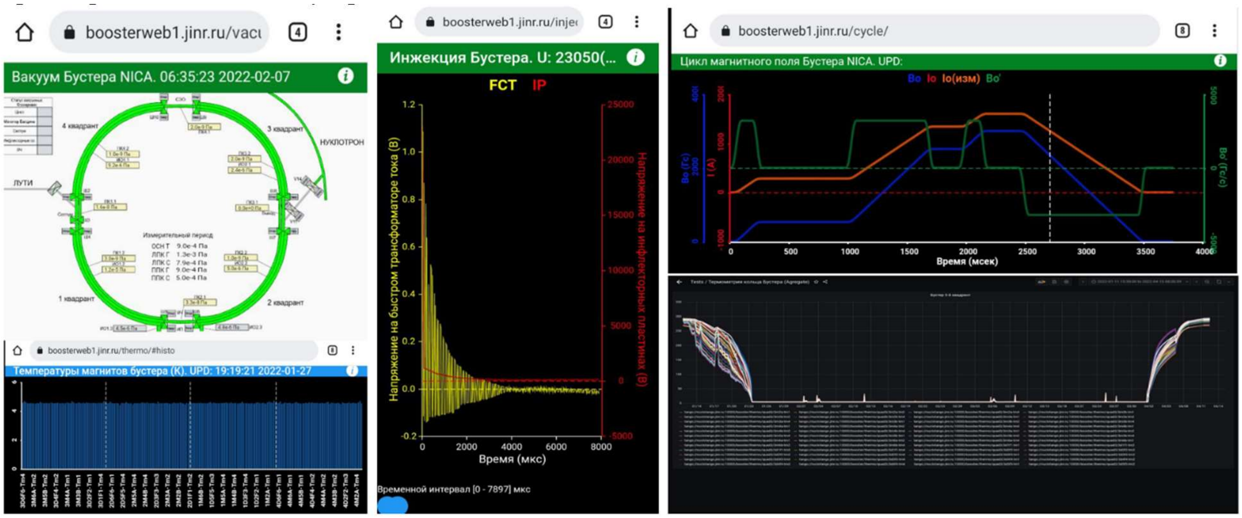


Рисунок 2: Веб-клиенты системы управления инжекционного комплекса NICA

Клиентский уровень

Задачей верхнего уровня является создание удобных, функциональных и безопасных графических операторских интерфейсов для контроля и управления системами инжекционного комплекса.

Для доступа к любому устройству Tango используется стандартная утилита AtkPanel. Библиотека Taurus позволяет вести разработку несложных клиентских приложений, используя набор готовых компонентов. Для среды LabView реализованы компоненты для связи с устройствами Tango. Сложные клиентские приложения разрабатываются с использованием библиотек Qt, Tango C++ или PyTango.

В системе управления инжекционного комплекса широко представлены веб-клиентские приложения, примеры которых представлены на рисунке 2. Их преимущества заключаются в независимости от операционной системы и типа устройства (персональный компьютер, планшет, смартфон) и централизованном обновлении. Веб-приложение может отображать данные в виде мнемосхем, таблиц, графиков и взаимодействуют с устройствами Tango через REST сервис или WebSocket [16]. Устройство RestDS [17] предназначено для взаимодействия с Tango-устройствами системы управления через стандартные http(s) запросы, и поддерживает отображение структуры системы, чтение и запись атрибутов, выполнение команд. WebSocketDS [18] предназначен для обмена данными с Tango-устройствами по протоколу WebSocket. Поддерживается чтение и запись атрибутов, выполнение команд, подписка на события.

Для объединения отдельных веб-клиентов в полноценную среду управления предполагается использовать инструмент Grafana [19], которая позволяет создавать гибкие интерфейсы и настраивать их согласно предпочтениям операторов. Для удобной навигации между отдельными страницами разработано специальное приложение-агрегатор, использующее технологию iframe.

Сервисы системы управления

Авторизация и контроль доступа. Для авторизации и разграничения прав доступа используется серверная система проверки прав доступа, основанная на ролях [20]. Пользователю назначается набор ролей, каждая из которых подразумевает определенный набор полномочий для доступа к устройствам.

Мониторинг. Для мониторинга оборудования и программного обеспечения используется система Zabbix [21], в которую при помощи http запросов интегрирован опрос Tango-устройств. Система позволяет создавать наглядные мнемосхемы. В случае изменения состояния контролируемого объекта Zabbix отправляет сообщение инженеру через Telegram.

Логгирование. Для просмотра отладочной информации от Tango-устройств используется стандартная утилита LogViewer. Чтобы обеспечить сохранение отладочной информации в базу данных, разработано устройство логгер [22], а также клиентское приложение для просмотра сохраненной информации.

Архивация. Для архивации данных в системе управления используется стандартный механизм Tango HDB++ [23] с базой данных TimeScaleDB в качестве хранилища. Данные архивируются, используя механизм событий. Для просмотра архивных данных применяется Grafana с прописанными источниками данных через Postgres. Для загрузки архивных данных используется устройство HDBppTSExtractor и специальный веб-интерфейс.

Управление оборудованием и программным обеспечением. Для конфигурации Tango-устройств используется механизм свойств, которые хранятся в центральной базе данных Tango. Работа с базой осуществляется при помощи специальной утилиты Jive.

Для автоматического запуска и управления устройствами используется стандартный механизм стартеров. На каждом хосте запускается устройство Starter, которое осуществляет запуск и остановку всех устройств этого хоста. Для управления стартерами служит стандартная утилита Astor. Для удаленного управления питанием стоек с оборудованием и мониторинга внутренней температуры разработано специальное устройство, управляемое по Ethernet.

СТАТУС ГОТОВНОСТИ

Система управления источника тяжелых ионов KRION, RFQ, Линейного Ускорителя Тяжелых Ионов работает автономно и будет интегрирована при помощи шлюза CollectorDS.

Системы управления каналов перевода пучка ЛУТИ-Бустер и Бустер-Нуклотрон реализованы на Tango Controls и интегрированы в общую систему управления.

Система управления Бустера [24], основанная на технологии Tango Controls, успешно отработала в течении несколько сеансов инжекционного комплекса. В настоящее время идет доработка системы коррекции орбиты и развитие системы диагностики пучка [25].

Система управления Нуклотрона изначально была разработана без применения Tango Controls, но в процессе модернизации основные подсистемы были переведены на Tango. В настоящее время ведутся работы по переводу в Tango системы термометрии, отлаживается система коррекции орбиты и развивается система диагностики пучка.

Системы управления Коллайдера и канала перевода пучка Нуклотрон-Коллайдер находятся в стадии разработки и будут полностью интегрированы в общую систему управления, основанную на технологии Tango Controls.

Система синхронизации комплекса NICA [26] также разрабатывается с учетом необходимости интеграции с устройствами под управлением Tango Controls.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ЛФВЭ ОИЯИ была разработана система управления инжекционного комплекса NICA, основанная на технологии Tango Controls. Создана необходимая инфраструктура для работы системы управления: компьютерная сеть, кластер серверов, распределенное дисковое хранилище. Разработаны сервисы для проверки прав доступа, администрирования, журналирования, мониторинга, архивации данных. Созданы механизмы интеграции промышленных систем автоматизации и сторонних систем управления. Разработанная система показала свою работоспособность в нескольких сеансах работы инжекционного комплекса. В настоящее время ведется расширение интеграции отдельных элементов инжекционного комплекса в общую систему управления, разработка системы управления Коллайдера и объединение этих систем для обеспечения надежной и гибкой работы всего ускорительного комплекса NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Trubnikov G., Agapov N., Brovko O. et al.NICA Project at JINR // Proc. of IPAC2013,Shanghai, China, May 2013

[2] https://www.tango-controls.org/

[3] https://supermicro-russia.ru/

[4] https://www.proxmox.com/

[5] https://ceph.io/

[6] https://www.ni.com/en.html

[7] http://tangodevel.jinr.ru/git/tango/hardware/ni

[8] http://tangodevel.jinr.ru/git/tango /hardware/psmbus-ds-serial

[9] https://www.i-tech.si/

[10] https://git.jinr.ru/tango/communication /modbusds.git

[11] http://tangodevel.jinr.ru/git/tango /communication/OPCDADS

[12] https://git.jinr.ru/tango/communication /opcuads.git

[13] http://tangodevel.jinr.ru/git/tango /communication/serialline

[14] http://tangodevel.jinr.ru/git/tango /communication/SocketDS

[15] https://git.jinr.ru/tango/communication /collectords.git

[16] Sedykh G.S., Gorbachev E.V., Elkin V. G. Tango Web Access Modules and Web Clients for NICA Control System // Proc. of ICALEPCS-2017, Barcelona, Spain, 2017, pp. 806–808

[17] https://git.jinr.ru/tango/web/restds2.git

[18] https://git.jinr.ru/elkinvg/websocketds.git

[19] https://grafana.com/

[20] E. Gorbachev, G. Sedykh, Development of NICA control system: access control and logging // Proc. of ICALEPCS-2017, Barcelona, Spain, 2017, pp. 822-825.

[21] https://www.zabbix.com/ru

[22] http://tangodevel.jinr.ru/git/tango /administration/devlogger

[23] https://tango-controls.readthedocs.io /en/latest/tools-and-extensions/archiving /HDB++.html

[24] В. Андреев, В. Волков, Е. Горбачев и др., Система управления и диагностики пучка Бустера NICA, // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т.17, №4(229). С. 615-620

[25] E. Gorbachev at al., Beam diagnositcs at NICA injection complex, RuPAC-2023, report 310

[26] Г. Фатькин и др., Система синхронизации и задающего ВЧ Комплекса НИКА: проект и первые результаты,RuPAC-2023, устный доклад

BEAM EXTRACTION IN MSC230 ISOCHRONOUS CYCLOTRON

I. D. Lyapin, O. V. Karamyshev, S. V. Gurskiy, V. A. Malinin, D. V. Popov, JINR, Dubna, Russia

Abstract

JINR is developing a new MSC230 isochronous cyclotron for proton therapy [1, 2]. In this paper, the beam extraction from the accelerator using an electrostatic deflector and several magnetic correctors was discussed. In particular, two variants of beam extraction were compared: along the spirality of sectors and against it.

MAGNETIC FIELD

Magnetic field of the MSC230 cyclotron shown on Fig 1.

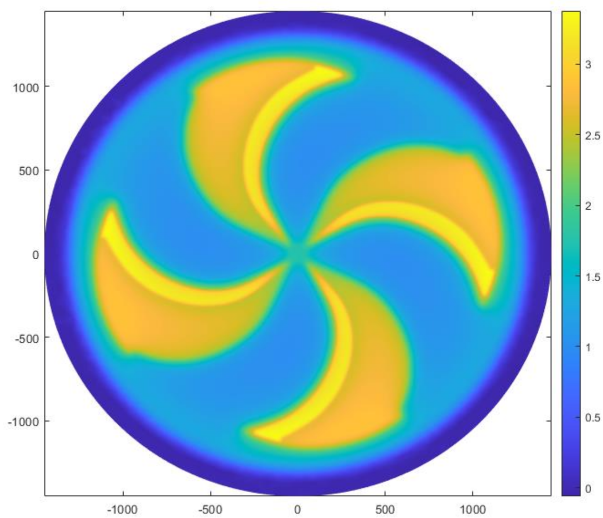


Figure 1: Magnetic field in the median plane, T.

The magnetic field was isochronized by changing the function of the sector width (Fig. 2). Orbital frequencies were analysed with CORD [3] (Closed Orbit Dynamics) – A Field Map Evaluation Tool for Cyclotron Particle Dynamic. Orbital frequency is shown on Fig. 3. In the acceleration zone, the deviation of the field from the isochronous field is no more than 2 Gauss (Fig. 4).

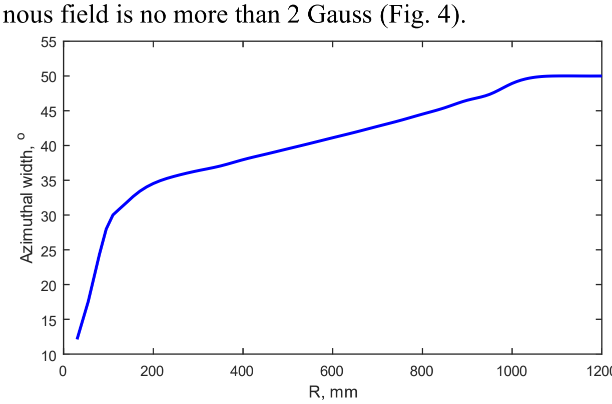


Figure 2: Azimuthal width of sectors.

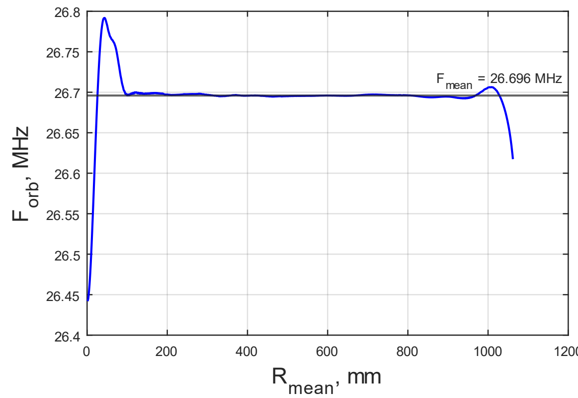


Figure 3: Orbital frequency compared to the mean one.

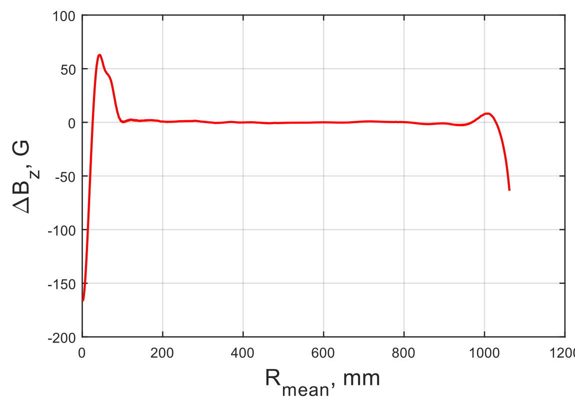


Figure 4: Difference between average and isochronous field.

All dangerous resonances were avoided (Fig. 5, Fig. 6).

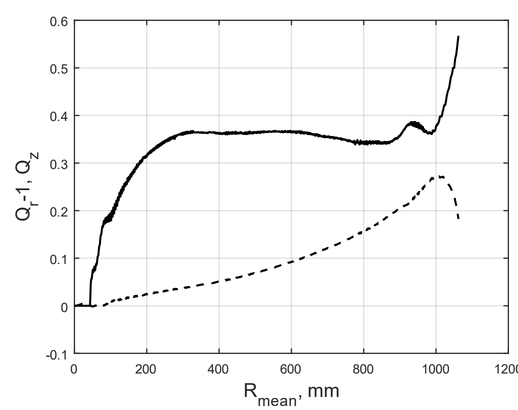


Figure 5: Betatron tunes.

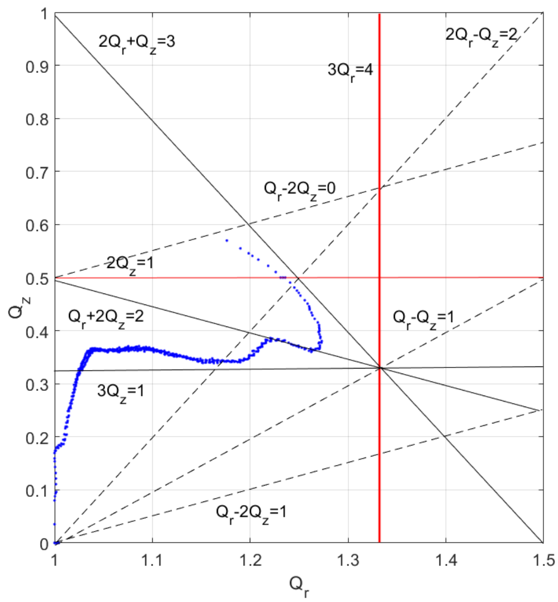


Figure 6: Working diagram.

BEAM DIRECTION

Usually, in isochronous cyclotrons, the extraction is made along the spirality of the sectors. In our case, the sectors have a protruding part with a smaller gap, so it was decided to check, among other things, the possibility of extraction against the spirality.

To compare these two options, the position of the deflectors was chosen so that the average energy of the particles at the entrance to the deflector was about 231 MeV.

For this comparison, a beam accelerated from 100 MeV was used which occupied almost the entire emittance. The actual beam will not be as wide.

The beam profile at the deflector entrance is shown in Fig. 7 and Fig. 8. Along spirality, we have a more compact beam, therefore more particles will be lost on the 0.15 mm septum.

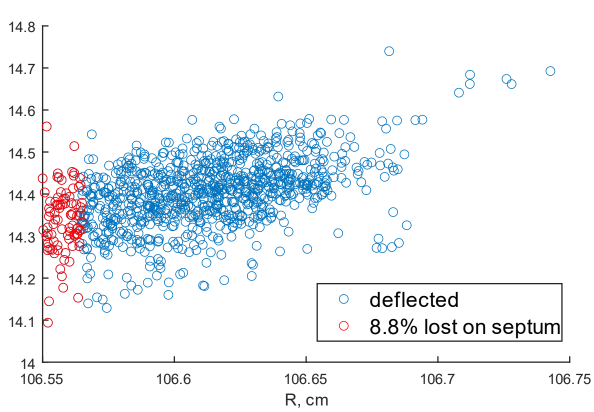


Figure 7: Beam profile at the deflector entrance ALONG spirality.

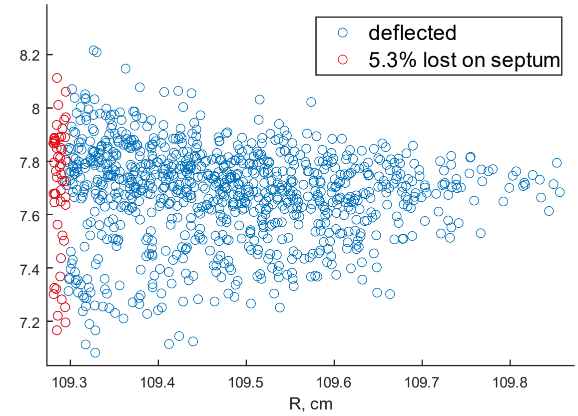


Figure 8: Beam profile at the deflector entrance AGAINST spirality.

Trajectories of the particles starting from the beginning of the deflector are shown in Fig. 9 and Fig. 10. The radius here is given relative to the median of the beam trajectory.

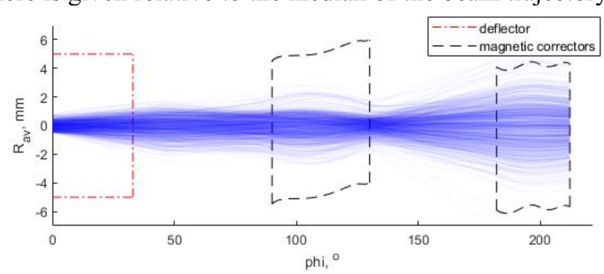


Figure 9: Particles' trajectories after the deflector ALONG spirality.

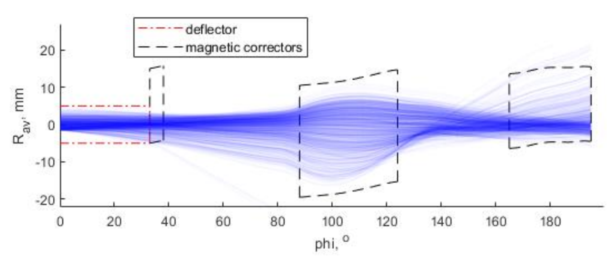


Figure 10: Particles' trajectories after the deflector AGAINST spirality.

When the beam is extracted against the spirality, it is located further from the center and falls on the magnetic field gradient at the edge of the sector. This option requires fine-tuning of the magnetic field and more complex correctors.

CONCLUSIONS

1. There is an advantage in deflector radial aperture for the along-spirality variant.
2. Along the spirality, we will lose more particles on the septum.
3. Against the spirality, it will be a challenge to make magnetic correctors for a neat beam.

REFERENCES

[1] O.V. Karamyshev et al., Research and Development of the Superconducting Cyclotron SC230 for proton Therapy//P9-

2020-17//Physics of Particles and Nuclei Letters, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 63–74.

[2] O.V. Karamyshev et al., Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy. IPAC 2019 // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf., TUPTS059.

[3] Karamyshev O., Karamysheva T., Lyapin I., Malinin V., Popov, D. (2021). Cord (Closed Orbit Dynamics): A New Field Map Evaluation Tool for Cyclotron Particle Dynamics. Physics of Particles and Nuclei Letters. Vol. 18, No 4. pp.481-487.

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ ОТ SIS18 ДО SIS100 ДЛЯ FAIR

Г. Н. Баранов, Т. В. Бедарева, , А. М. Долгов, К. В. Жиляев, В. В. Кобец, И. А. Лопаткин, И. Н. Окунев, С. В. Шиянков – ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия
С. А. Быков, В. А. Востриков, И. И. Морозов* – ИЯФ СО РАН/НГУ, Новосибирск, Россия

Аннотация

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) – строящийся в Дармштадте (Германия) международный ускорительный комплекс, который будет использовать антипротоны и ионы для проведения исследований по ядерной физике, физике элементарных частиц, атомной физике, физике конденсированного состояния и др. Важным элемент комплекса - транспортный канал между ускорительными кольцами от SIS18 до SIS100.

Конструкция магнитов была разработана в сотрудничестве между FAIR и ИЯФ. В ИЯФ СО РАН были изготовлены, протестированы и отправлены в FAIR магнитные элементы канала: дипольные магниты Dip15-0, Dip15-1, Dip16-0, Dip17-0, квадрупольные линзы Q2 и корректирующие магниты S18.

Дипольные магниты имеют длины 1.961, 2.260, 2.937, 3.907 м при индукция магнитного поля 1.6 Тл в зазоре 80 мм. Неоднородность интеграла магнитной индукции вдоль магнита меньше 0,4% в рабочей апертуре 120 мм.

Квадрупольные магниты имеют длину 1000 мм при градиенте индукция магнитного поля 10 Тл/м. Неоднородность интеграла градиента магнитной индукции вдоль магнита меньше 0,5% в рабочей апертуре диаметром 120 мм.

Корректирующие магниты имеют длину 200 мм при индукция магнитного поля 0.093 Тл в зазоре 259 мм.

В докладе приведены сравнения расчетов и измерений магнитных полей.

Ключевые слова - магниты, расчеты магнитных полей, магнитные измерения

ВВЕДЕНИЕ

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) – строящийся в Дармштадте (Германия) международный ускорительный комплекс [6], который будет использовать антипротоны и ионы для проведения исследований по ядерной физике, физике элементарных частиц, атомной физике, физике конденсированного состояния и др. Важным элементом комплекса является HEBT (High Energy Beam Transport) – система транспортных каналов между ускорительными кольцами SIS18, SIS100 и экспериментальными установками.

Для перепускного канала пучков ионов от SIS18 до SIS100, с магнитной жёсткостью 18 Тл·м, в ИЯФ СО РАН были спроектированы, изготовлены, подготовлены и отправлены магнитные элементы: дипольные магниты Dip15-0, Dip15-1, Dip16-0, Dip17-0; квадрупольные линзы Q2; корректирующие магниты S18. На рисунке 1 представлена схема части канала HEBT от SIS18 до SIS100.

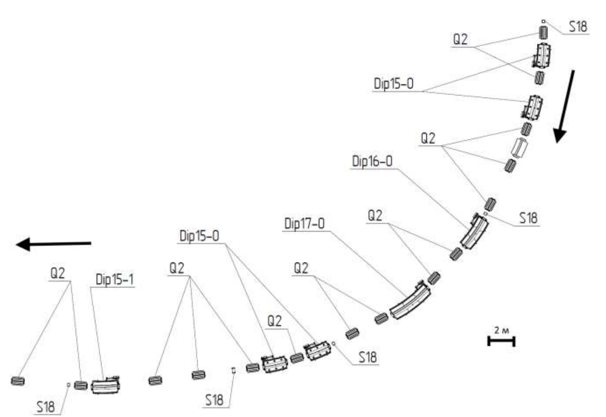


Рис. 1. Часть канала HEBT между ускорительными кольцами SIS18 и SIS100

МАГНИТЫ

Магниты состоят из магнитопровода и катушек возбуждения. Магнитопровод собирается из сердечников (2-х для диполей и корректоров, 4-х для квадруполя) и стягивается болтами. Шихтованный сердечник магнита склеивается из пластин толщиной 1 мм.

Дипольные магниты играют основную роль в транспортировке пучка, направляя (поворачивая) его в канале.

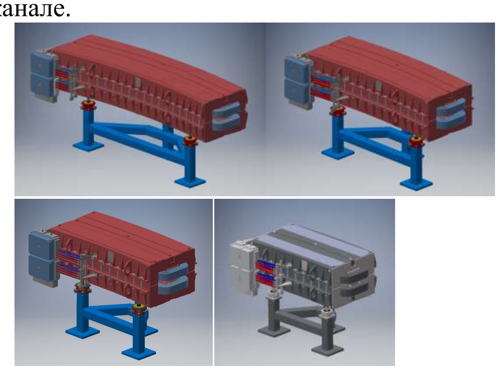


Рис. 2. Дипольные магниты Dip17-0, Dip16-0, Dip15-1, Dip15-0

*morozov@inp.nsk,su

Квадрупольная магнитная линза нужна для фокусировки пучка, чтобы он не «раздувался». Квадрупольная линза фокусирует пучок по одной из поперечных осей.

Для пучка с магнитной жёсткостью 18 Тл·м фокусное расстояние квадрупольной линзы составляет 1,8 м.

Корректирующий магнит исправляет ошибки, набегающие во время движения пучка по каналу.

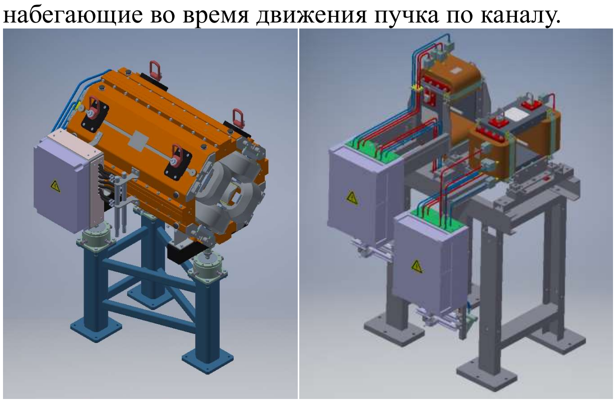


Рис. 3. Квадрупольный магнит Q2 (слева), корректирующий магнит (справа)

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения магнитного поля проводились с помощью каретки с массивом датчиков Холла (пример каретки, которой измерялась квадрупольная линза представлен на рисунке 4). В магниты помещались рельсы (в дипольный магнит помещают одну пару рельс, в квадрупольную линзу – две пары рельс), по которым движется каретка. Каретка движется с помощью вытягивающего двигателя. Магнитное поле измеряется в трёх параллельных плоскостях относительно полюса магнита для диполей, в двух перпендикулярных плоскостях в квадруполе и в одной параллельной полюсу плоскости для корректора.

Принцип работы основан на датчиках Холла. В приборе, которым измеряли магнитное поля квадруполя и корректора, 17 датчиков Холла расположенных в линию (расстояние между крайними датчиками составляет 152.1 мм). Тем самым позволяет произвести измерения в разных точках магнита по направлению движения каретки. В каретке, которой измеряли диполи, 21 датчик.

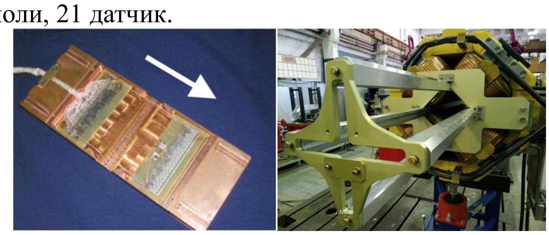


Рис. 4. Примеры: измерительный прибор с датчиками Холла (в открытом состоянии) (слева); квадруполь с рельсами, по которым движется каретка (справа)

РАССЧЕТЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ НЕВТ

Для расчёта магнитов использовалась программа COMSOL.

Для расчёта были взяты модели магнитов, которые были упрощены: диполи и корректор – 2 половинки магнитопровода, 2 упрощённые катушки, квадрупольные линзы – 4 упрощённые катушки, 4 четвертинки сердечника. После этого данная модель импортировалась в программу расчёта COMSOL. Диполь и корректор симметричен в поперечной плоскости, поэтому можно посчитать половину диполя. Также квадрупольная линза симметрична в двух продольных плоскостях, можно рассчитывать только четверть линзы. Далее нужно задать необходимые параметры катушки, сердечника и окружающего пространства (пример на рисунке 5 (слева)).

Для вывода данных были сымитированы измерения с помощью каретки с массивом датчиков Холла (пример на рисунке 5 (справа)).

СРАВНЕНИЕ РАССЧЕТОВ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Дипольные магниты

Так как дипольные магниты отличаются только длиной и результаты расчётов и измерений практически одинаковы, то достаточно будет привести результаты только одного из диполей, а именно Dip17-0. Сравнение результатов расчёта и измерений приведены на рисунках 5 и 6.

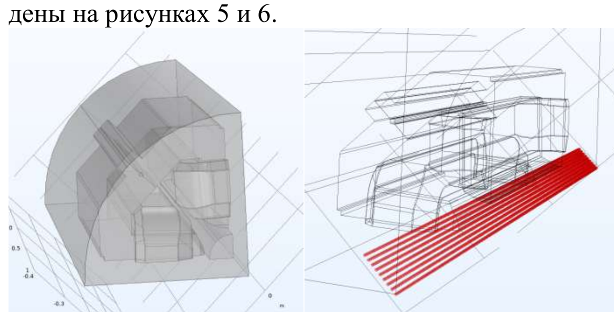


Рис. 5. Необходимая геометрия для произведения расчётов квадрупольной линзы Q2 (слева); точки измерения магнитного поля имитирующие измерения каретки с массивом датчиков Холла (справа)

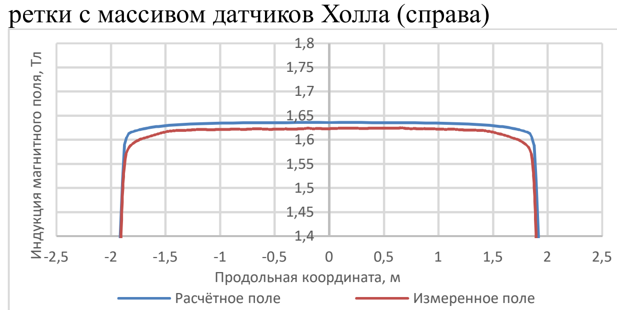


Рис. 6. Сравнение индукции магнитного поля расчётных и измеренных данных в зависимости от продольной координаты дипольного магнита

Отличие расчётных и измеренных данных ~0,6% для всех дипольных магнитов.

На рисунке 7 представлены расчётный и измеренный интегралы однородности магнитного поля на всём промежутке измерений дипольного магнита Dip17-0.

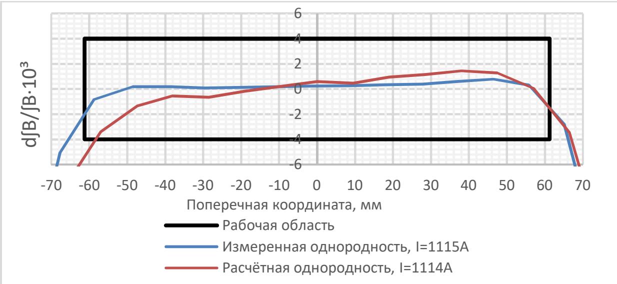


Рис. 7. Расчётная и измеренная интегральные однородности магнитного поля дипольного магнита

Квадрупольный магнит Q2

Квадрупольный магнит имеет линейную зависимость интеграла магнитного поля от поперечной координаты (рисунок 8).

Сравнение расчетного и измеренного градиента магнитного поля от координаты вдоль движения пучка приведено на рисунке 9.

Расчётный градиент магнитного поля совпадает с измеренным, за исключением того, что в расчётных данных он более однородный, чем измеренный. Это связано с однородностью магнитопровода и допусками апертуры, так как он изготавливается из пластин, и наличием паразитных гармоник в измеряемом магните. Отличие расчётных данных и измеренных ~0,6%.

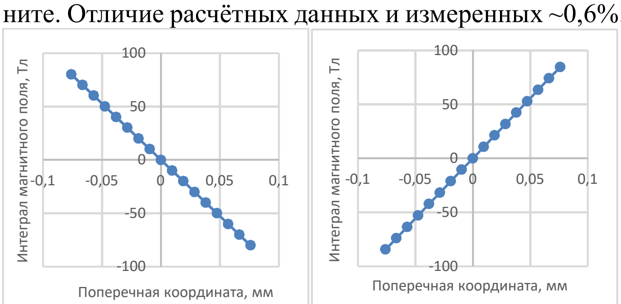


Рис. 8. Зависимость интеграла индукции магнитного поля квадруполя от поперечной координаты: слева расчётная, справа измеренная

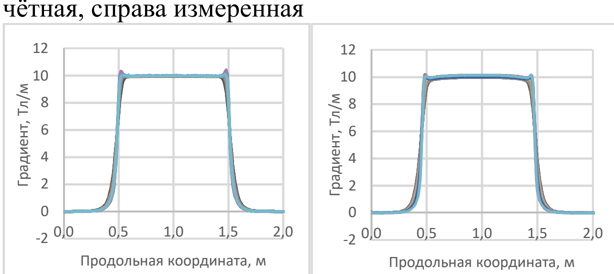


Рис. 9. Зависимость градиента магнитного поля от продольной координаты: слева расчётный, справа измеренный

Интегральная однородность лежит в пределах допустимого техническим заданием (рисунок 10).

Корректирующий магнит S18

На рисунке 11 приведены расчётная и измеренная интегральные однородности магнитного поля одного из магнитов корректора S18.

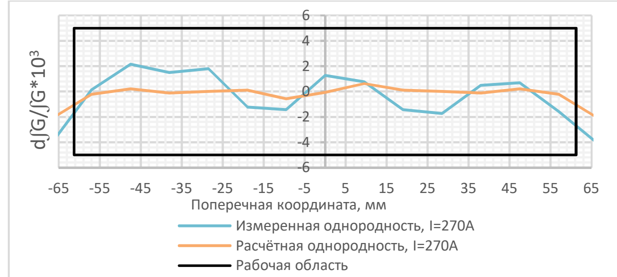


Рис. 10. Расчётная и измеренная интегральная однородность магнитного поля квадрупольной линзы

Данные лежат в рабочей области, что соответствует техническому заданию. Расчётные и измеренные данные совпадают с хорошей точностью ~0,2%.

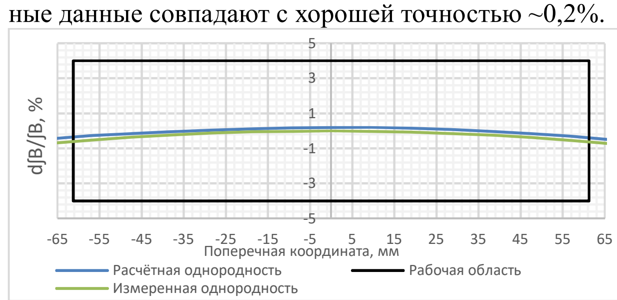


Рис. 11. Расчётная и измеренная интегральная однородность магнитного поля корректирующего магнита

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено несколько необходимых вещей для произведения расчётов: важно следить за качеством сетки в необходимых областях магнита, иначе полученные данные могут быть с ошибками; надо использовать модель с профилем магнита идентичный рабочему чертежу; при проектировании магнита нужно тщательно подбирать форму профиля полюса для того, чтобы поля в таком магните соответствовало техническому заданию.

После обработки измеренных и расчётных данных наблюдалось их соответствие с хорошей точностью (~0,6% для диполей и квадруполей, ~0,2% для корректора).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ivan Okunev, Alexandr Batrakov, Valeriy Kobets, and Ivan Morozov Field Measurements of Magnets for Modern SR Sources and FEL // IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, NO. 4, JUNE 2016

[2] Персов Б.З. Расчёт и проектирование экспериментальных установок // Москва-Ижевск, 2006

[3] Th. Zickler Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets // ed. By D. Brandt Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Magnets, Bruges, Belgium, CERN-2010-004 (2009)

[4] Павленко А.В. Диссертация Многофункциональные цифровые интеграторы для прецизионных измерений магнитных полей в элементах ускорителей // Новосибирск – 2015

[5] Gutbrod H., Augustin I., Eickhoff H., Groß K., Henning W., Krämer D., Walter G. FAIR Baseline Technical Report, Volume 2, 2006

НАСТРОЙКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНОГО СВЧ ТРАКТА СТЕНДА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНЖЕКТОРА ПРОЕКТА СКИФ

К. И. Смирнов[1,2], А. Е. Левичев[2], С. Л. Самойлов[2]
[1]НГТУ, Новосибирск, Россия
[2]ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

Абстракт

В разработке находится проект «Сибирского Кольцевого Источника Фотонов» («СКИФ») [1]. Этот источник синхротронного излучения 4+ поколения позволит проводить исследования в различных областях науки. «СКИФ» состоит из синхротрона, кольца накопителя и линейного ускорителя. Линейный ускоритель рассчитан на энергию 200 МэВ [2]. В кольце накопителя электронные пучки набирают необходимую для работы синхротрона энергию 3 ГэВ. Линейный ускоритель проекта «СКИФ» состоит из пяти регулярных ускоряющих структур (УС), предускорителя-группирователя (ПГ), источника электронов, магнитной системы, а также волноводного СВЧ тракта, необходимого для доставки мощности (50 МВт) от клистрона до ускоряющих структур. Рабочая частота клистрона 2856 МГц. В данной статье описана работа, измерения и настройка элементов волноводного тракта от первого клистрона, который в настоящее время работает совместно с начальной частью ускорителя в ИЯФ СО РАН.

ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель работает в импульсном режиме [2]. Для его работы требуется СВЧ мощность величиной 50 МВт на рабочей частоте 2856 МГц и частотой повторения 1 Гц. Волноводный тракт представлен на рисунке 1.

От первого клистрона мощность поступает в 7-ми дБ-й ответвитель, в котором она делится между первой регулярной ускоряющей структурой и предускорителем-группирователем в соотношении 80:20. После ответвителя меньшая часть мощности поступает в аттенюатор и фазовращатель, которые подстраивают нужную величину мощности и фазу волны, поступающей в предускоритель-группирователь. Большая часть мощности поступает через фазовращатель в первую регулярную ускоряющую структуру.

Так как волноводный тракт является комплексным устройством, то необходимо было проводить измерения и настройку каждого участка отдельно. Ниже приводятся измерения отдельных элементов волноводного тракта, а также описание их настройки.

7-МИ ДБ-Й ОТВЕТВИТЕЛЬ

7-ми дБ-й ответвитель представлен на рис. 2. Он характеризуется наличием плунжера 4. Перемещение плунжера позволяет менять коэффициент ответвления. Когда электромагнитная волна попадает во вход 1, то в месте пересечения волноводов образуется три волны, в сторону выходов 1, 2 и плунжера. Последняя полностью отражается и в определенной фазе возвращается в место пересечения. Фаза, которую набирает отраженная волна, будет зависеть от расстояния, на которое выдвинут плунжер. На выходах 2 и 3 образуется суперпозиция волн с определенным соотношением переносимой мощности.

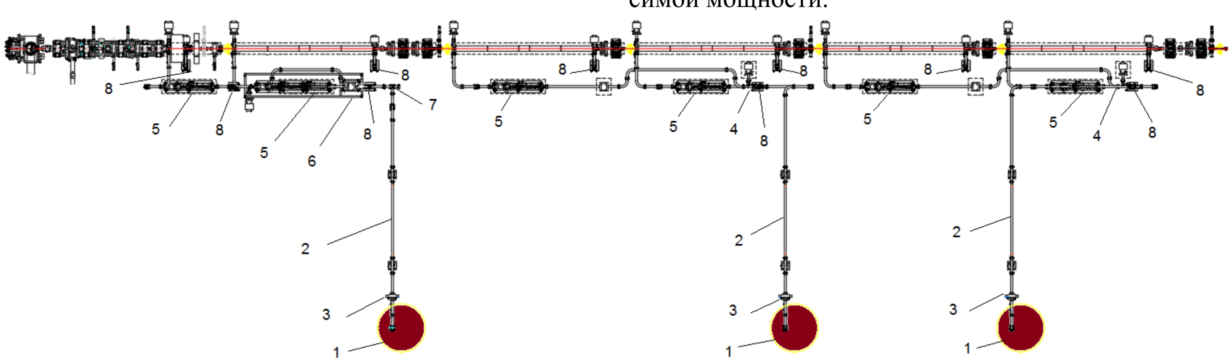


Рисунок 1: Схема волноводного тракта: 1 – клистрон, 2 – волноводы, 3 – волноводный шибер, 4 – 3-х дБ-ые ответвители, 5 – фазовращатели, 6 – аттенюатор, 7 – 7-ми дБ-й ответвитель, 8 – согласованные нагрузки.

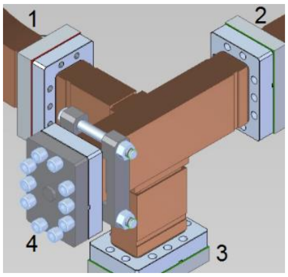


Рисунок 2: 7-ми дБ-й ответвитель.

Данный ответвитель позволяет плавно менять коэффициент ответвления с высокой точностью. Недостатком данной конструкции является зазор между стенкой волновода и плунжеров, в котором из-за поверхностных токов может возникнуть СВЧ пробой.

На рис. 3 показаны результаты моделирования 7-ми Дб-го ответвителя, которое показало, что на вход в предускоритель-группирователь (плечо 1 рисунка 2) ответвляется -6.9365 дБ (Рис. 3), что эквивалентно 20.2% мощности. На вход регулярной ускоряющей структуры (плечо 2 рисунка 2) ответвляется -1.0211дБ, это эквивалентно 79% мощности. На отражения приходится 0.8%.

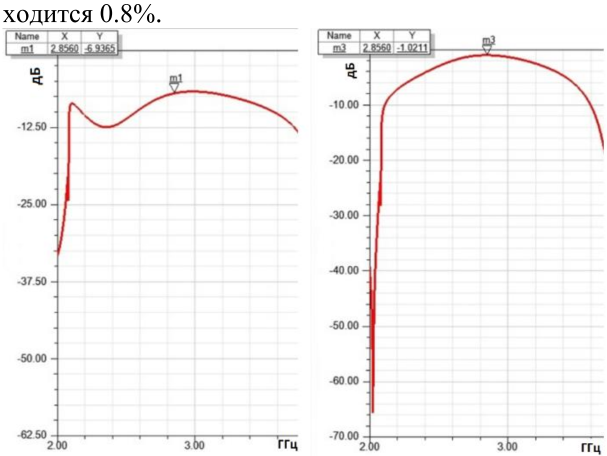


Рисунок 3: Результаты моделирования ответвителя. слева – ответвление в аттенюатор, спрва – ответвление в первую секцию УС

ФАЗОВРАЩАТЕЛЬТЕЛЬ

Для функционирования волноводного тракта применяется несколько волноводных фазовращателей. Они выполняют функцию подстройки фазы электромагнитной волны, которая поступает в секцию линейного ускорителя, а также участвуют в работе волноводного аттенюатора. Фазовращатель представляет из себя прямой волновод, с возможностью изменения его апертуры. Важнейшим параметром волновода является критическая (максимальная) длина волны [3].

$$\lambda_{\mathrm{mn}\ cr} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{a}}\right)^2 + \left(\frac{\mathrm{n}}{\mathrm{b}}\right)^2}} \qquad (1)$$

a и b – размеры широкой и узкой сторон волновода соответственно, m и n – номера мод колебаний электромагнитной волны по соответствующим координатам.

Из формулы (1) следует, что критическая длина волны зависит от апертуры волновода и от номера гармоники электромагнитной волны. Линейный ускоритель рассчитан на работу на самой низкочастотной моде H_{10}, а значит критическая длина волны равна $\lambda_{10\ cr=}2\mathrm{a}$. Длина волны вдоль волновода и изменение фазы зависит от критической длины волны и частоты следующим образом:

$$\varphi = \frac{2\pi \mathrm{L}}{\Lambda}, \Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\mathrm{cr}}}\right)^2}}, \lambda = \frac{c}{f_0} \qquad (2)$$

f_0 – частота генератора, L – эффективная длина фазовращателя, Λ – длина волны вдоль волновода, φ – набег фазы в волноводе.

Так как длина фазовращателя остаётся неизменной, а поперечные размеры меняется, то фаза электромагнитной волны на выходе будет изменяться по следующему закону (Λ_1 и Λ_2 – длины волн в волноводе (2) до и после изменения апертуры фазовращателя):

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \mathrm{L} \cdot \left(\frac{1}{\Lambda_2} - \frac{1}{\Lambda_1}\right) \qquad (3)$$

Из формул (1)-(3) видно, что процесс изменения фазы электромагнитной волны, проходящей через фазовращатель нелинейный. На практике расчет изменения фазы усложняется неравномерностью изменения апертуры волновода вдоль фазовращателя, не мгновенной деформацией металла, люфтом подвижных частей и другими конструкционными особенностями. Это приводит к необходимости снятия фазовых характеристик с каждого фазовращателя в индивидуальном порядке.

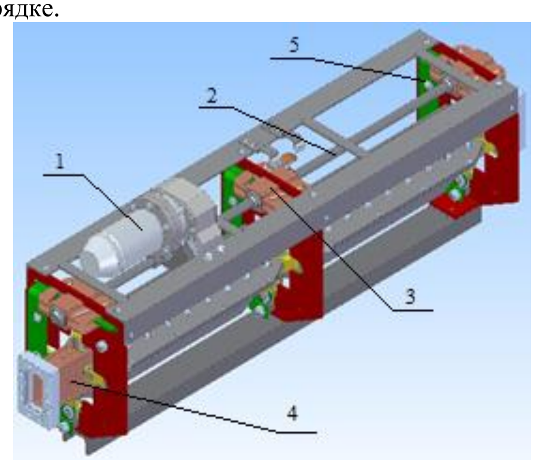


Рисунок 4: 3D-модель фазовращателя: 1 – шаговый двигатель, 2 – вал, 3 – каретки, 4 – волновод, 5 - рычаги

Для управления фазовращателем используется контроллер и шаговый двигатель. Шаговый двигатель совершает определенное количество шагов в требуемом направлении с заданными скоростью и ускорением. Шаги двигателя приводят в движение вал, который смещает три каретки, которые посредствам рычагов деформируют волновод.

В ходе первых измерений были выявлены следующие дефекты:

- Заклинивание шагового двигателя при достижении определенного количества шагов;
- Смещение рычагов.

После исправления данных дефектов были получены фазовые характеристики фазоращателей. На рисунке 5 показана фазовая характеристика одного из фазовращателей, диапазон изменения фазы составил 274°, также на ней виден эффект гистерезиса. Данный эффект оказывает значительное влияние на работу фазоращателя и его необходимо учитывать при подстройке фазы.

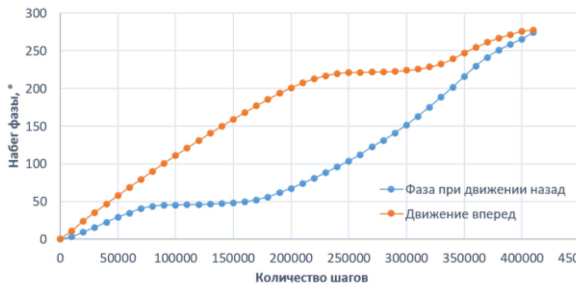


Рисунок 5: Фазовая характеристика фазовращателя при движении шагового двигателя в одном и другом направлении.

Помимо гистерезиса в ходе измерений был обнаружен эффект релаксации фазы, характеризующийся изменением фазы после остановки шагового двигателя. На Рисунке 6 видно, что релаксация фазы приводила к набегу $1° - 1.5°$. Этот эффект также необходимо учитывать при работе с фазовращателем так как точность подстройки фазы на линаке «СКИФ» должна составлять $\sim 1°$.

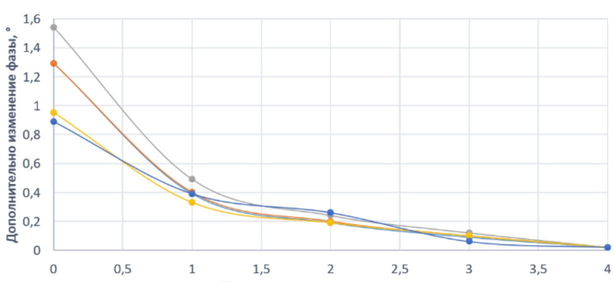


Рисунок 6: Дополнительный набег фазы в следствие релаксации фазы в зависимости от времени после остановки шагового двигателя.

3-Х ДБ-Й ОТВЕТВИТЕЛЬ

3-х дБ-й мост представляет из себя два прямоугольных волновода, соединенных узкой стороной (м Риунок 7), в которой есть щель определенного размера. Если на один из входов поступает СВЧ мощность, то она делится поровну между противоположными выходами с разностью фаз $\pi/2$. Данный процесс обратим, а именно, если на вход поступает две волны с разностью фазы $\pi/2$, то их мощности складываются, в противном же случае излишки ответвляются в нагрузку.

Рисунок 7: 3-ч дБ-й ответитель.

3-х дБ-ые ответвители будут пользоваться для питания УС на линаке «СКИФ», ответвляя половину мощности в каждую УС. Так же данные ответители являются составной частью волноводного аттенюатора, обеспечивающего питание предускорителя-группирователя. Измерения данных ответвителей, используемых в волноводном тракте клистрона 1 продемонстрированы в таблице 1.

Таблица 1: амплитудные характеристики 3-х дБ-го ответвителя

Выходы	Ответвление, дБ	Ответвление, %
3-1	-2.964	50.536
3-2	-3.069	49.328
Потери	-	0.136

ВОЛНОВОДНЫЙ АТТЕНЮАТОР

Для подстройки СВЧ мощности предускорителя-группирователя был разработан волноводный аттенюатор. Работа аттенюатора основана на прицепе складывания двух электромагнитных волн с одинаковой амулетной, но разной фазой. С помощью фазовращателя, расположенного в коротком плече аттенюатора (Рисунок. 8), можно регулировать набег фазы одной из волн после 3-х дБ-го ответвителя. Как было описано выше, по свойствам данного ответвителя, при разности фаз $\pi/2$ вся мощность будет поступать в одно из плеч последующего 3-х дБ-го ответвителя. При другом набеге фаз часть мощности будет уходить в нагрузку, которая расположена в другом плече последующего 3-з дБ-го ответвителя.

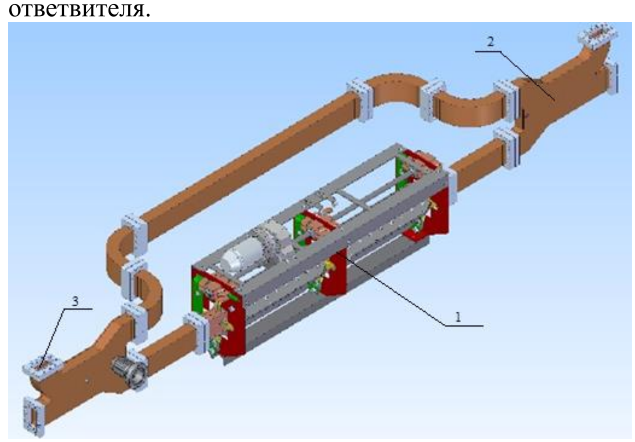


Рисунок 8: Волноводный аттенюатор: 1 – фазоращатель, 2 – 3-х дБ-ые ответвители, 3 – выход в нагрузку.

Формула (4) отражает процесс суммирования двух волн в плече 3-х дБ-го ответвителя аттенюатора. Из формулы (4) видно, что при изменении амплитуды электромагнитной волны так же происходит изменение фазы. Для коррекции фазы необходимо использовать совместно с аттенюатором фазовращатель, расположенный на входе в ПГ.

$$\frac{A}{2}\cos(\omega t) + \frac{A}{2}\cos(\omega t + \varphi) = A\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\cdot cos\left(\omega t + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

Для измерения волноводного аттенюатора использовался электродвигатель, изменяющий поперечное сечение волноводного фазовращателя между двумя 3-х дБ-ми ответвителями, показанными на рис. 8. Прямое движение двигателя характеризуется сдвигом центральной каретки от шагового двигателя (Рисунок. 9), а обратное направление - соответственно в противоположную сторону.

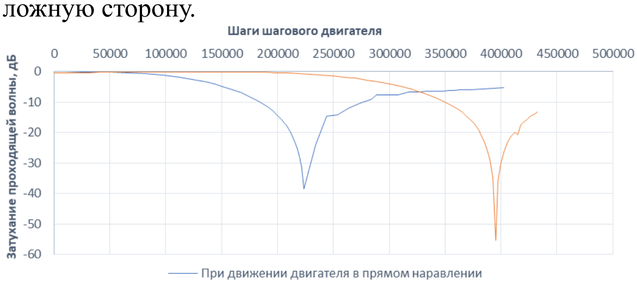


Рисунок 9: Амплитудная характеристика волноводного аттенюатора

Из графика видно, что вблизи 0 шагов затухание почти не меняется. Из-за гистерезиса точка максимального затухания сместилась. Минимальное затухание с поправкой на затухание в кабелях составило 0.2дБ, а максимальное – 55,3дБ. Так как в этой точке волны складываются в противофазе, то затухание стремиться к $-\infty$, и точность измерения становиться невысокой. Так как у этого аттенюатора стоит задача подстраивать необходимую мощность, диапазона движения шагового двигателя хватит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проведены измерения и настройка различных волноводных элементов СВЧ тракта линейного ускорителя инжектора «СКИФ».

- Было проведено моделирование 7-ми дБ-го ответвителя.
- Были подтверждены свойства двух 3-х дБ-ых ответвителей;
- Проведены измерения фазовых характеристик фазовращателей. Были выявлены конструкторские ошибки, которые должны быть исправлены в этих и последующих фазовращателях, которые будут стоять на СВЧ тракте.
- Был промерен волноводный аттенюатор, получены зависимости выходной мощности от количества шагов, пройденных шаговым двигателем. Измерения показали, что предложенная конструкция аттенюатора работоспособна, но имеется существенный гистерезис, связанный с фазовращателем.

Выявленные недостатки и особенности волноводного тракта будут учтены в последующих трактах линейного ускорителя инжектора «СКИФ».

ИСТОНИКИ

[1] G. Baranov, A. Bogomyakov, I. Morozov *et al*. “Lattice optimization of a four-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk” *Phys. Rev. Accelerator and Beam 24, 2021*

[2] Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A. Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I., Samoylov S., Volkov V. Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector. *Journal of Instrumentation* V. 17, Iss. 2. 2022

[3] Лебедев И. В. Л33 «Техника и приборы СВЧ. П ред. Академика Н. Д. Девяткова. Учебник для студентов вузов по специальности «Электронные приборы», М., «Высш. школа», 1970 440 стр. с илл 1 л. вкл

МАГНИТЫ ЛАМБЕРТСОНА ДЛЯ СИСТЕМ ИНЖЕКЦИИ И БЫСТРОГО ВЫВОДА ПУЧКА НУКЛОТРОНА

О.А. Кунченко*, А.В. Бутенко, А.В. Кудашкин, В.А. Михайлов, Д.Н. Никифоров, М.В. Петров, А.Н. Свидетелев, В.В. Селезнёв, В.Л. Смирнов, А.В. Тузиков, М.М. Шандов[1]
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
[1] также Государственный Университет «Дубна», Дубна, Россия

Аннотация

Центральной установкой ускорительного комплекса NICA является сверхпроводящий синхротрон Нуклотрон с максимальной магнитной жёсткостью 40 Тл*м. Для перевода пучка в Нуклотрон из нового бустерного сверхпроводящего синхротрона спроектирована и введена в эксплуатацию новая система инжекции. Для перевода пучка ионов в коллайдер NICA создаётся система быстрого вывода из Нуклотрона. Ключевыми элементами указанных систем являются сверхпроводящий магнит Ламбертсона и ударный магнит. В работе представлены основные конструктивные особенности и характеристики разработанных в ОИЯИ сверхпроводящих магнитов Ламбертсона.

ВВЕДЕНИЕ

В рамках реализации проекта NICA для создания цепочки инжекции тяжёлых ионов в Коллайдер создаются две новые системы Нуклотрона: инжекции и вывода пучка [1,2].

Из-за особенности взаимного расположения сверхпроводящих (СП) синхротронов инжекция и вывод пучка из Нуклотрона осуществляется по вертикали, для чего применяются магниты Ламбертсона [3].

В конце 90-х годов аналогичная задача стояла при создании системы медленного вывода пучка из Нуклотрона, которая была решена с использованием двух СП магнитов Ламбертсона [4]. Подобное решение использовано и при создании новых систем, с тем отличием, что новые магниты Ламбертсона рассчитаны на работу в статическом режиме, в то время как магниты Ламбертсона медленного вывода являются быстроциклирующими.

Конструкции СП магнитов Ламбертсона систем инжекции и вывода пучка во многом схожи. Отличия состоят в основном в величине максимального магнитного поля в апертуре выводимого пучка, в конструкции вспомогательной обмотки, корректирующей рассеянное поле в апертуре циркулирующего пучка, и наличии высоковакуумной камеры.

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТА ЛАМБЕРТСОНА

За основу конструкции магнитов Ламбертсона инжекции и быстрого вывода пучка ионов из Нуклотрона взято магнитное ярмо второй секции магнитов Ламбертсона медленного вывода пучка заряженных частиц из Нуклотрона МЛ2 [5].

Магнитопровод изготовлен из листовой электротехнической стали марки Э 330-А толщиной 0,5 мм. Штампованные листы железа имеют изоляционное покрытие из фосфатной пленки для снижения величины индуцируемых токов Фуко. Магнитопровод состоит из двух частей и собран в «замок», длина магнитного ярма составляет 1,5 м. Каждая часть магнитопровода при изготовлении сжимается в продольном направлении с усилием $1{,}2\text{x}10^5$ Н, после чего к магнитопроводу приварены пластины с пазами из стали Ст3 с помощью аргонодуговой сварки. Охлаждение железного ярма магнита до температуры гелиевого уровня (4,5–5 К) осуществляется через медные трубки диаметром 12 мм, расположенные в пазах приваренных пластин и припаянные к ним. Магнит Ламбертсона имеет две апертуры: одна – для циркулирующего пучка 116x70 мм^2, вторая – для отклонения пучка 44x236 мм^2.

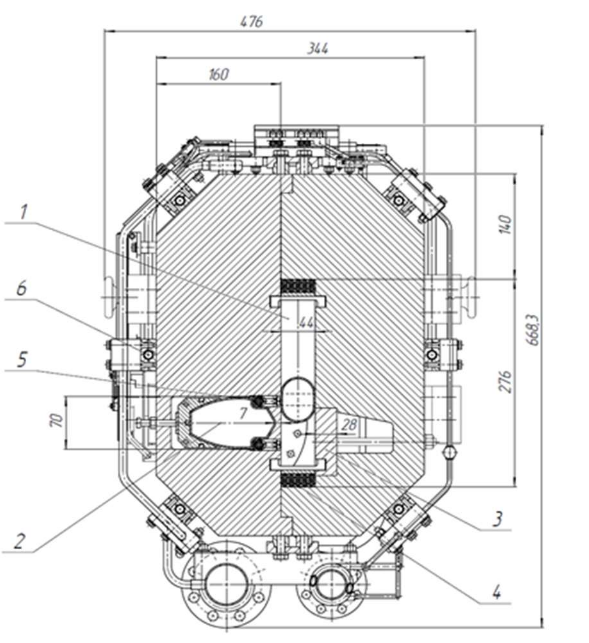


Рисунок 1. Поперечное сечение магнита Ламбертсона. 1- камера отклоняемого пучка; 2 – камера циркулирующего пучка; 3 – вставка из стали Ст3; 4 – основная обмотка; 5 – вспомогательная обмотка; 6 – трубки охлаждения ярма.

*kunchenko@jinr.ru

Магнитопровод МЛ2 имеет трапециевидный вырез для минимизации рассеянных полей в апертуре циркулирующего пучка. Одним из отличий магнитов систем инжекции и быстрого вывода от магнитов Ламбертсона медленного вывода является прохождение отклоняемого пучка в области данного выреза. Для обеспечения требуемой однородности магнитного поля в области отклоняемого пучка разработана специальная вставка из стали Ст3 сечением 28x90 мм^2 (см. Рис. 1, поз. 3) для установки в области выреза.

Магнит имеет две обмотки: основную для возбуждения магнитного поля в апертуре отклонения пучка и вспомогательную для компенсации рассеянного поля в области циркуляции пучка. Основная обмотка выполнена из трубчатого сверхпроводящего кабеля с изолированными проводами (см. Рис. 2), охлаждаемого потоком двухфазного гелия. Поток гелия протекает по мельхиоровой Cu-Ni трубке с наружным диаметром 5 мм и толщиной стенки 0,5 мм, с электроизоляцией полиимидной плёнкой толщиной 40 мкм и перекрытием 50 %. Поверх плёнки укладываются 30 сверхпроводящих Nb-Ti проводов диаметром 0,5 мм с дополнительным электроизоляционным покрытием толщиной 30мкм (с количеством волокон 6426, диаметром волокон 4,1 мкм и коэффициентом заполнения 0,16) и шагом скрутки 4-6 мм. Снаружи СП провода сбандажированы с помощью капроновой лески диаметром 0,2 мм и покрыты ещё одним слоем полиимидной плёнки и слоем препрега из стеклоленты, пропитанной эпоксидным компаундом горячего отверждения толщиной 0,1 мм с перекрытием 50 %. Основные параметры кабеля приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры СП кабеля.

Диаметр трубки, мм	5,0x0,5
Диаметр СП провода (без изоляции), мм	0,56 (0,5)
Кол-во проводов, шт	30
Диаметр бандажной лески, мм	0,2
Толщина полиимидной изоляции, мкм x2	40
Толщина стеклоленты, мм	0,1
Диаметр кабеля, мм	7,2
СП материал	Nb-Ti

Основная обмотка магнита двухслойная, по пять витков СП кабеля в каждом слое. Изолированные СП провода соединены последовательно, таким образом, основная обмотка включает в себя 300 витков СП провода. Индуктивность основной обмотки составляет 0,96 Гн. Вспомогательная обмотка магнита быстрого вывода конструктивно выполнена в виде одного витка такого же кабеля и включает в себя 30 витков СП провода. Вспомогательная обмотка магнита инжекции выполнена из медной трубки диаметром 6 мм с толщиной стенки 1 мм.

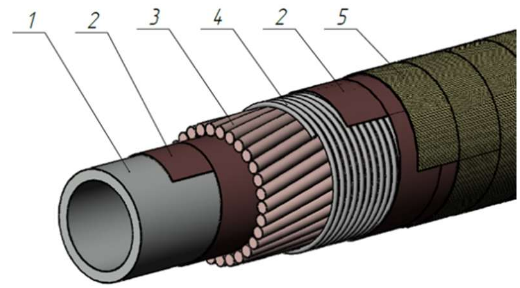


Рисунок 2. Сверхпроводящий кабель. 1 – трубка; 2 – полиимидная изоляция; 3 – сверхпроводящие изолированные провода; 4 – бандажная леска; 5 – препрег.

Высоковакуумная камера инжекционного магнита (см. Рис. 3) разделена на камеры отклоняемого и циркулирующего пучков, выполненные в виде единой конструкции из нержавеющей стали AISI 316 LN с относительной магнитной проницаемостью не более 1,01. Рабочее давление в камере 10^{-7} Па.

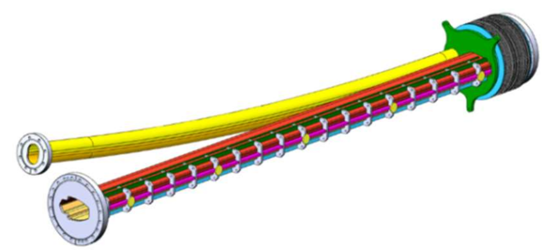


Рисунок 3. Общий вид высоковакуумной камеры магнита.

Таблица 2. Основные характеристики магнитов Ламбертсона.

	Инжекционный	Выводной
Длина по железу, мм	1500	
Апертура для отклонения пучка: Ш/В, мм	44/236	
Апертура для циркулирующего пучка: Ш/В, мм	116/70	
Толщина магнитного септума, мм	7	
Число витков обмотки:		
Основная, шт	300	
Вспомогательная, шт	1	30
Рабочее значение тока в обмотке:		
Основная, А	130	200
Вспомогательная, А	30	185
Индуктивность основной обмотки, Гн	0,96	
Индукция магнитного поля в камере отклоняемого пучка, Т	1,1	1,6
Режим работы	Статический	

Камера отклоняемого пучка представляет собой секторную трубу овального сечения с толщиной стенки 2 мм. Камера циркулирующего пучка имеет сечение фасонного профиля с рёбрами жёсткости и толщиной стенки 2 мм. Камера дополнительно имеет специальные уступы для размещения вспомогательной обмотки.

Основные параметры магнитов инжекции и быстрого вывода приведены в Таблице 2.

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Расчет полей магнитов Ламбертсона проводился для двух- и трёхмерного случаев с использованием коммерческой программы Opera-Tosca. Расчетные модели включали все значимые элементы с минимальными упрощениями при конвертации из сборочного чертежа и учитывали коэффициент заполнения, характеризующий магнитопровод, набранный из шихтованной электротехнической стали. Использовались кривые намагниченности стали, измеренной для образцов, используемых в производстве магнитов Нуклотрона.

Анализировалось распределение магнитного поля в областях циркулирующего и отклоняемого пучков. Особое внимание уделено исследованию рассеянного горизонтального поля в области циркуляции пучка. Проведена серия итерационных расчетов по изучению оптимальных размеров и формы внутренней апертуры магнита для минимизации величины рассеянного поля. Изучены различные пространственные конфигурации с использованием одного и двух компенсирующих витков. Расчёты показывают, что рабочий ток 25-30 А*витков позволяет уменьшить компоненту B_x в области циркулирующего пучка, при этом питание корректирующей обмотки не оказывает влияния на компоненту B_y.

Также моделирование подтвердило, что вставка из стали Ст3 увеличивает величину и однородность поля в области инжекционного (отклоняемого) пучка, при этом незначительно увеличивая уровень рассеянного поля в зоне циркулирующего пучка.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И СИСТЕМА ЗАЩИТЫ

Для питания основной обмотки инжекционного магнита Ламбертсона применяется источник питания PS140-8S производства фирмы EVPU (Словакия), рассчитанный для работы с индуктивной сверхпроводящей нагрузкой до 1,4 Гн и максимальным рабочим током 140 А. Источник питания PS140-8S имеет внешний модуль, который служит для вывода запасённой энергии из магнита на внешний резистор гашения энергии (см. Рис. 4). Для питания вспомогательной обмотки используется источник питания марки Glassman с максимальным рабочим током до 140 А.

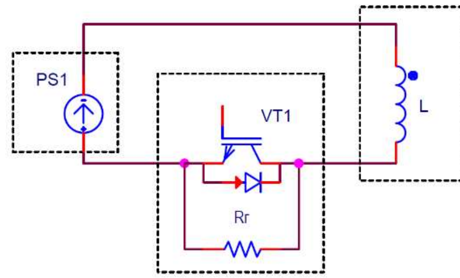


Рисунок 4. Принципиальная схема системы питания и эвакуации энергии: PS1 – источник питания магнита; VT1 – транзисторный ключ IGBT; Rг – резистор гашения энергии; L – обмотка магнита.

Система защиты СП обмотки магнита Ламбертсона построена с применением следующих элементов: датчики детектирования нормальной зоны (НЗ) и система эвакуации запасенной энергии на внешний резистор гашения. Датчики детектирования НЗ Д1, Д2, Д3 (см. Рис. 5.) контролируют напряжение методом измерительного моста [6]. Средние точки обмотки магнита взяты со смещением, чтобы детектировать НЗ в случае симметричного нагрева СП проводов в одной полуобмотке. Датчик Д3 дублирует датчики Д1 и Д2 на случай возникновения НЗ в средней точке полуобмоток. Пороговое напряжение – 60 мВ, время сравнения – 5 мс. Дополнительный датчик Д4 контролирует падение напряжения на обмотке. Пороговое напряжение датчика не превышает 5 % индуктивного напряжения на обмотке. Дополнительно с работой системы защиты СП обмоток можно ознакомиться в [6].

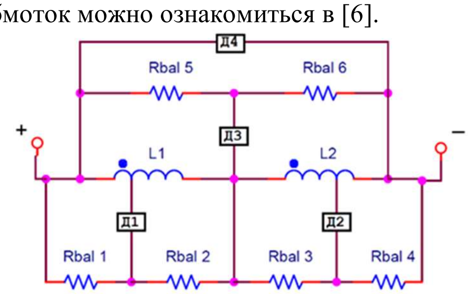


Рисунок 5. Электрическая схема подключения датчиков НЗ: Д1, Д2, Д3 – датчики детектирования НЗ методом измерительного моста; Д4 – датчик детектирования НЗ методом контроля напряжения на обмотке; L1, L2 – СП полуобмотки магнита; Rbal – подстроечные резисторы измерительного моста внутри датчика НЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка и сборка магнитов осуществлялась в ОИЯИ. При создании новых систем инжекции и вывода Нуклотрона разработаны два варианта магнитов Ламбертсона. Применение специального СП кабеля с изолированными проводами позволяет использовать независимое от структурных элементов Нуклотрона питание при сохранении системы охлаждения, единой с другими структурными элементами магнито-оптической системы установки, что не требует организации специальных «тёплых» участков в местах установки магнитов. Независимое питание МЛ даёт возможность осуществлять более гибкую настройку режимов инжекции и выводе пучка.

Магнит системы инжекции изготовлен, испытан, установлен в магнитокриостатную систему кольца Нуклотрона и успешно используется в работах ускорительного комплекса NICA. В ходе сеанса пуско-наладочных работ №3 Бустера с использованием новой системы инжекции, в которую входит созданный магнит Ламбертсона, успешно инжектирован пучок углерода $^{12}C^{6+}$ в Нуклотрон.

Магнит системы быстрого вывода находится на финальной стадии технической разработки и подготовки к производству.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] E. Syresin et al. Status of accelerator complex NICA // Proceedings of RuPAC 2018, 2018.

[2] E. Syresin et al. NICA accelerator complex at JINR // Proceedings of IPAC 2019, 2019.

[3] J. Tanabe, "Iron Dominated Electromagnets: Design, Fabrication, Assembly and Measurements", Rep. SLAC-R-754, Jun. 2005.

[4] А.А. Смирнов, А.Д. Коваленко. «Нуклотрон – сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа и развитие)» // Письма в ЭЧАЯ, 2004, т. 1, №6 (123), с. 11–40.

[5] Михайлов В.А. и др. «Сверхпроводящий магнит Ламбертсона для вывода пучка из Нуклотрона» // Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, 1994, т. 4, с. 14–22.

[6] Иванов Е.В. и др. «Датчики перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих элементов ускорительного комплекса NICA» // Письма в ЭЧАЯ, 2014, т. 11, №4(188), с. 753–759.

AUTOMATED RADIATION MONITORING SYSTEM (ARMS) AND INTERLOCK AND SIGNALIZATION SYSTEM (ISS) OF THE CYCLOTRON U400M

P.A. Komarov, S.V. Mitrofanov, V.Yu. Shegolev, JINR, Dubna, Russia

Abstract

Nowadays Flerov Laboratory of Nuclear Reactions provides a broad modernization program of the accelerator complex. In particular, it has the modernization of the U400M cyclotron. As a part of this work, there is modernization of the Automated Radiation Monitoring System (ARMS) and Interlock and signalization system (ISS), which ensure radiation safety of the personnel working at the U400M.

This report is an overview of two modern systems, namely the ARMS of building 101 and the ISS of the U400M. The report presents main types of the radiation monitoring carried out by the ARMS, the equipment used for radiation monitoring, and capabilities of the ARMS software. It also contains the logic of the ISS operation, modes of operation of the U400M facility, and the main elements of the ISS. In addition the paper shows the logic of the interaction between the ARMS and the ISS with each other, and the interaction of these systems with the Control System of the U400M.

INTRODUCTION

Nowadays Flerov Laboratory of Nuclear Reactions at Joint Institute for Nuclear Research provides a broad program of the accelerator complex modernization as a part of DRIBS III program [1]. Thus, within the framework of this program, the DC 280 accelerator was put into operation in 2019. Currently, the work is underway to modernize the U400M accelerator. In the future, the work is planned to reconstruct the U400 accelerator. In addition, the work is underway to implement the project of the new DC140 accelerator.

Due to the fact that such facilities are sources of secondary gamma and neutron radiation that occurs during their operation (the operation of the ECR sources, the interactions between charged particles and ion-conducting elements, targets), such facilities are equipped with systems that ensure radiation safety of the personnel during operation of the accelerators, namely the automated radiation monitoring system (ARMS) and the interlock and signalization system (ISS).

As a part of the modernization of the U400M accelerator, due to the critical worn out of the dosimetry equipment used before the modernization, it was decided to modernize the U400M accelerator's ARMS, as well as the ARMS for all controlled objects located in the building where the U400M accelerator is located, namely building 101. The modernization work has affected such objects as: the U400M accelerator, radiochemical laboratories of the second and the third classes, the MT-25 accelerator of electron beams, the warehouse of isotopes and radioactive materials. Also, within the framework of this work, the ISS of the U400M accelerator is being modernized.

ARMS of building 101

Automated Radiation Monitoring system of FLNR building 101 is a hardware and software complex. The system includes a set of ionizing radiation detectors, a set of computers with licensed and applies software. ARMS works in communication with the ISS and ACS U400M accelerator. The ARMS software package was designed in the MasterSCADA development environment.

The ARMS of building 101 is designed for:

- Providing radiation monitoring in premises of radiation objects, on the territory of its industrial site, in sanitary protection zone;
- Archiving of radiation parameters measurements.
- Prompt identification of signs of the development of an emergency situation and taking actions to normalize the radiation situation;
- Providing automation of control of the set operating modes of the accelerator U400M
- Providing safe access of service and operating personnel to the halls of accelerators and physical cabins under permitted operating modes of accelerators and compliance with radiation safety standards.

The system combines tools from various dosimetry equipment manufacturers, such as: SPC «DOZA», «ATOMTEX», and JSC SPC «Aspect». The equipment used, its quantity and the types of radiation controlled by it are presented in Table 1. The characteristics of the devices are presented on the official websites of manufacturers [2,3,4].

Table 1: the equipment of the system and types of radiation controlled by it

Equipment type	Radiation type	Quantity in the system
UDBN-01 (Aspect)	neutron	26
UDBG-01 (Aspect)	gamma	16
UDKS-100PD (DOZA)	gamma	5
BDKR-01 (Atomtech)	x-ray	3
UDGB-01T1 (DOZA)	Volume activity of radioactive gases	5
UDA-1AB (DOZA)	Volume activity of radioactive aerosols	7
UPPVM (DOZA) + UDA-1AB/UDGB-01T1	Emission of radioactive substances into the environment	3

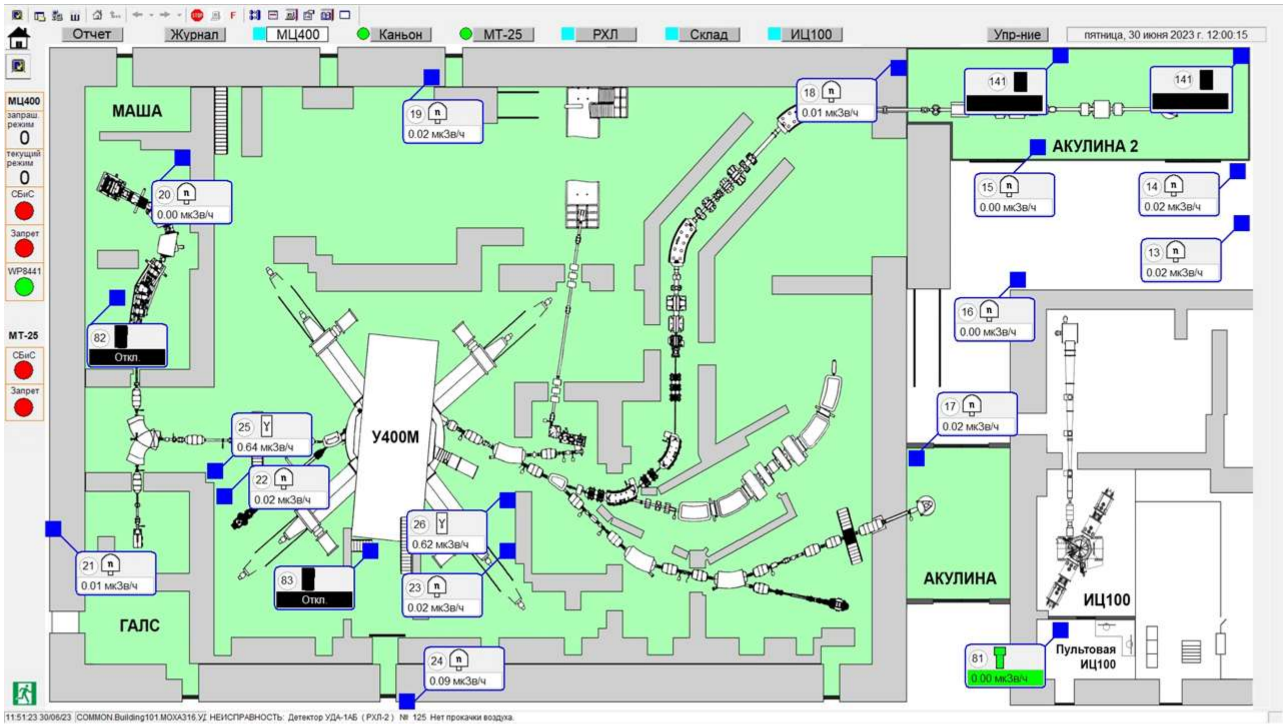


Figure 1: Mnemonic diagram of the specialized software of the ARMS of building 101

The system uses special licensed software, which allows:

- to receive, to store and to monitor the real-time information about the radiation situation at the controlled objects as a report or trends;
- to manage the parameters of the used dosimetry devices (setting of the emergency/warning thresholds);
- to set the operating modes of the dosimetry devices depending on the selected operating mode of the U400M accelerator;
- to automate the control over set operating modes of the accelerator.

The software is realized in the development environment Master SCADA 3.x., MasterOPC ModBus server, Multi Protocol MasterOPC server [5].

The mnemonic diagram of the program is shown in Figure 1. The program interface is a set of mnemonic diagrams, each of which represents a scheme of a controlled object and can be selected by clicking the corresponding button at the top of the program window. On the diagram there are special icons indicated the equipment used. The diagram and the icons have dynamization of events. The icons change their colors depending on the mode of the equipment (threshold exceeded, device malfunction).

When clicking on the icon of the device of interest, a properties window opens in which the thresholds for the device can be set, the values measured by this device in real time and their trends can be viewed, the device settings can be changed.

ISS of U400M

The Interlock and signalization system is a hardware and software complex that provides safe access for personnel to the controlled rooms of the U400M accelerator (accelerator hall, it's physical cabins).

ISS of U400R cyclotron is designed for :

- Monitoring the state of the doors (closed/open), the state of locks on these doors (locked/unlocked) leading to controlled premises;
- The position of the door keys in the prefabricated panel (key holder);
- Inspection control of controlled premises;
- Monitoring the state of the emergency stop buttons;
- Controlling of dosimetry equipment;
- Realizing sound and light alarm;
- Control of the accelerator elements that enable/disable the accelerator operation mode (elements preventing the beam from moving along the transport channels);
- Issuance of control signals.

The main task of the system is to control the access of the personnel to premises, where it is possible to exceed the radiation level. The control is provided by the inspection procedure of the room, without which the system does not allow the accelerator to start the acceleration process.

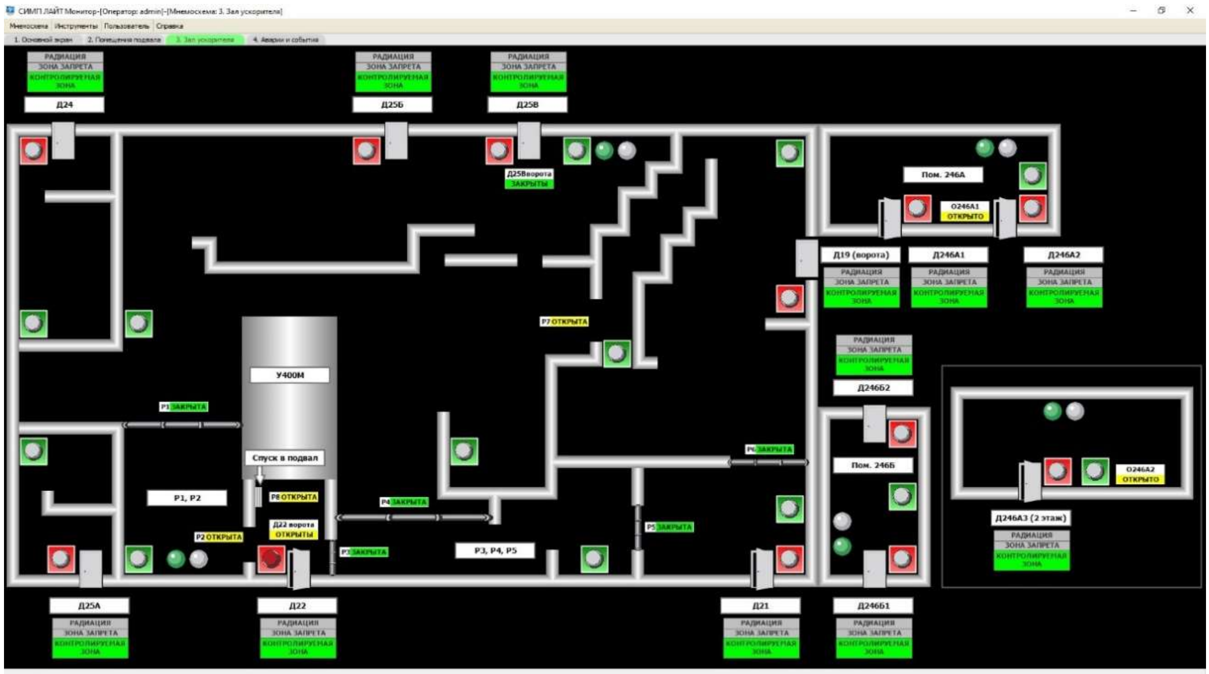


Figure 2: Mnemonic diagram of the software of ISS of U400M

The procedure of the premises inspection is carried out as follows: 1) an operator of the accelerator, before starting the accelerator operation, must inspect the rooms where, depending on the operating mode, the excess of the set radiation dose may occur and press special buttons in these rooms (room hall round buttons) that inform the system that the inspection has been performed. 2) the operator closes the doors, leading to the inspected premises and locks them with the keys. 3) the keys are placed in a special key holder in the accelerator control room, and are locked in it, until the operator unlocks them with a special button in the program.

The system also has signal light and sound equipment that signals the beginning of the acceleration process, and special buttons installed in controlled premises that allow stopping the acceleration process (accelerator shutdown buttons).

Figure 2 shows the mnemonic diagram of the U400M ISS software. The diagram displays the status of the main elements of the system, such as: inspection buttons, emergency buttons, doors (closed/opened), light alarm lights.

INTERACTION of ARMS, ISS and ACS U400M

In addition to the modernization of the systems themselves, an algorithm for the interaction of the systems with each other, as well as with the ACS U400M, was also implemented.

Initially, the automated control system of U400M requests permission from both systems to operate in the selected accelerator mode.

After that, the ISS waits until the inspection procedure described above is carried out in all controlled premises, while monitoring the operation of the system carried out, all elements of the system are in touch. After successful completion of the inspection procedure, the ISS gives its permission to work to the ACS, while simultaneously issuing a signal of readiness to work in the ARMS. Than ARMS checks the system elements, sets thresholds for dosimetry devices in accordance with the selected operating mode, after which it issues permission to the ACS.

As a result, the accelerator can start the acceleration process only after obtaining permissions from both described systems.

CONCLUSIONS

Most of the stages for the implementation of the described systems have been completed (initial data, technical specifications, project and installation work). At this stage, the systems are debugged and the interaction with the ACS is being debugged.

The systems are unified with the previously introduced systems that ensure the radiation safety of the personnel at the DC280 accelerator, by the type of the dosimetry equipment used, and by the type of the software used;

In the near future, it is planned to create unified systems for the DC140 accelerator, and further for the U400R accelerator

REFENCES

[1] http://flerovlab.jinr.ru/flnr-basic-setups-annual-reports-in-hours/
[2] https://www.doza.ru/en/
[3] https://www.aspect-dubna.ru/en/
[4] https://atomtex.com/en/node/
[5] https://insat.ru/

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ НУКЛОТРОНА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПАВИЛЬОН И КОРПУС 205

Киров С.В., Бутенко А.В., Карпинский В.Н., Анисимов С.Ю., Шурыгин А.А., Арефьев С.А., Копченов А.В.,Филиппов М.Н., Филиппов Н.А., Наумов О.Е., Сергеев А.В., Товстуха В.Г., Грибов Д.М., Травин Н.В., Караваев А.В., Купцов А.В., Кулаева Т.А., ОИЯИ, Дубна, Россия

Аннотация

В рамках проекта тяжелоионного Коллайдера NICA в Объединенном Институте Ядерных Исследований (Дубна, Россия) возводится новый ускорительный комплекс, который включает в себя новые каналы транспортировки пучка. В данной статье представлен проект модернизации системы электроснабжения канала транспортировки пучка заряженных частиц из Нуклотрона в измерительный павильон и корпус 205.

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном Институте Ядерных Исследований (Дубна, Россия) строится установка тяжелоионного Коллайдера на базе Нуклотрона (NICA), включающая в себя новый ускорительный комплекс [1, 2]. В рамках данного проекта существующий сверхпроводящий синхротронный Нуклотрон, который эксплуатируется с 1993 года, был модернизирован в соответствии со спецификациями проекта [3,4], были построены новые ускорители – линейный ускоритель тяжелых ионов (HILAC) и сверхпроводящий ускорительный синхротрон (BOOSTER) [5], а также каналы транспортировки пучка между этими ускорителями. Кроме того, был модернизирован канал «медленного» вывода пучка из Нуклотрона в измерительный павильон 1 на установки прикладных испытаний «СИМБО» и «ИСКРА» и в корпус 205 на установку BM@N. В статье рассказывается о работах по модернизации системы электроснабжения канала транспортировки пучка из Нуклотрона, проведенных в рамках модернизации канала «медленного» вывода пучка из Нуклотрона.

Рис 1: Канал транспортировки пучка к.205 к BM@N.

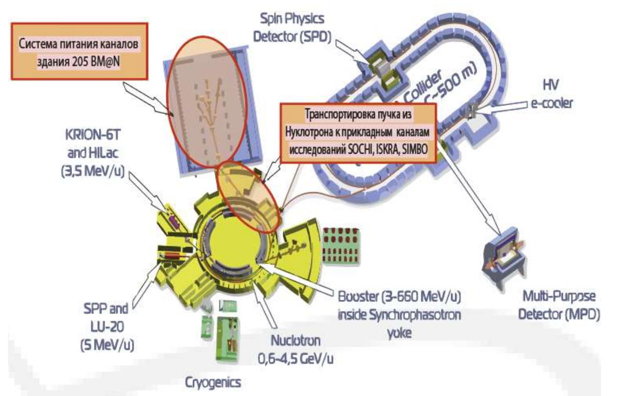


Рис 2: Канал транспортировки пучка к.205 BM@N и к каналам прикладных исследований SOCHI, ISKRA, SIMBO.

Система медленного вывода (МВ) пучка из Нуклотрона

Предназначена для равномерного по времени вывода пучка, циркулирующего в Нуклотроне на «столе» магнитного поля, и его перевода в канал транспортировки к экспериментальным установкам в здании № 205 и малом измерительном павильоне.

Система МВ в значительной степени реконструирована. Заменены источники питания резонансных линз раскачки, заменена система управления раскачкой с обратной связью. Введен дополнительный канал контроля за равномерностью растяжки с помощью возбуждения управляемого ВЧ шума кикера. В результате получена рекордная равномерность растяжки выведенного пучка тяжелых ионов в ускорительном сеансе №55.

Канал транспортировки пучка из Нуклотрона в к. №205

Служит для перевода пучка из Нуклотрона в экспериментальный зал корпуса № 205 и Измерительный павильон №1 (Рис.3), где размещаются экспериментальные установки BM@N и установки для прикладных исследований. Длина канала от выхода пучка из Нуклотрона до BM@N составляет около 170 м. До установки BM@N общая длина воздушных промежутков более 40 м.

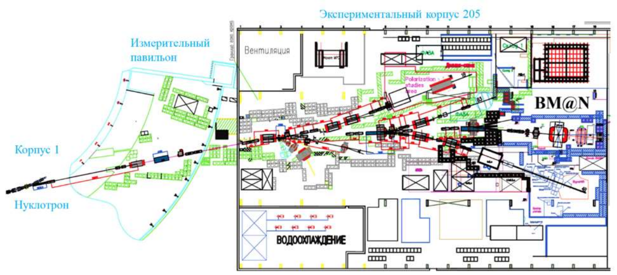


Рис 3: Схема каналов транспортировки на выведенных пучках Нуклотрона.

Ионопровод проходит через 27 элементов магнитной оптики, таких как квадрупольные линзы типа К100, К200, отклоняющие магниты типа СП-12А, СП-94, СП-40, СП-12 и корректирующие магниты.

Система электропитания состоит из следующих элементов: питающее распределительное устройство РУ-6кВ подстанции «К»; силовых трансформаторов 6/0,69 кВ; высокопрецизионных источников питания; шкафов переключения; кабельных трасс, автоматизированной системы управления (Рис.4)

Рис 4: Размещение оборудования системы питания в переключающем пункте, корп.1Б.


Рис 5: ПС-К, 6 кВ.

На данный момент все работы по модернизации системы питания завершены.

Работы по введению в строй распределительного устройства РУ-6кВ и силовых трансформаторов 6/0,69 кВ, реконструкция подстанции, изготовление прецизионных источников начаты в 2018 г.

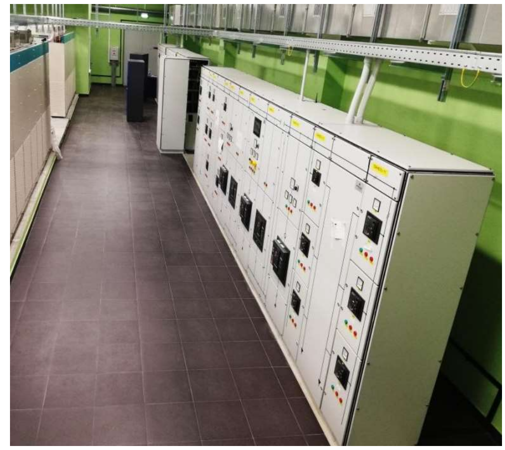


Рис 6: РУ 0,69 кВ.

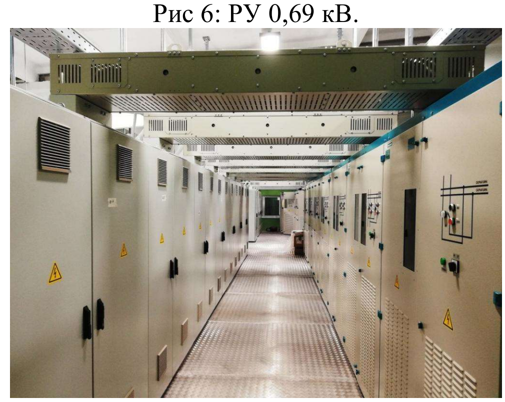


Рис 7: Шкафы переключения 2/4 кА.


Рис 8: Источники питания.

Рис 9: Размещение оборудования системы питания каналов корпуса 205.

В этих работах принимают участие российские фирмы НПП ЛМ Инвертор», «ЭПП-Т» «ДСС инжиниринг» и польская фирма «FrakoTerm»

Рис 10: Построенные модульные здания трансформаторов и ПС 15 для систем питания транспортировки пучков в к.205.

Источники питания

Особенностями проектируемой системы питания магнитных элементов (МЭ) являются большая сила тока (от 600 А до 4000 А), относительно невысокое напряжение (от 75 В до 230 В).

Система питания была существенно модернизирована за последние годы. Получено новое качество и стабильность тока питания магнитной системы. Точность поддержания и повторяемость токов достигает $1{\cdot}10^{-4}$ в широком диапазоне рабочих значений, что является на сегодня практическим пределом для ускорительных систем в мире.

Рис 11: Подстанция ПС 15. Внутри расположены высоковольтные ячейки типа DP-12P.

Рис 12: Шкафы с источниками питания в к.205.

Рис 13: Источник питания.

Обладает улучшенными характеристики за счет использования современных технологий преобразования энергии с применением мощных и высокочастотных вентилей IGBT

Источник питания состоит из 3х модулей конвертеров. Каждый конвертер работает на частоте 20,8кГц с 120° сдвигом относительно других, что позволяет модулировать выходную частоту напряжения.

. Таким образом суммарная частота источника составляет 62,4кГц, то есть в 100 раз больше, чем на источнике Нуклотрона с его 12 фазами.

Далее эквивалентная частота модуляции выходного напряжения Ш.И.М.-пульсации фильтруются с помощью L-фильтра. Совместным действием конверторов обеспечивается прецизионное исполнение задаваемого тока нагрузки в катушках магнитной системы канала транспортировки пучка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3 февраля 2022г завершен четвертый, самый длительный в истории ускорительного комплекса NICA сеанс в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ. Команда проекта отработала режимы совместной работы всех элементов тяжелоионной инжекционной цепочки коллайдера, достигла рекордной для Нуклотрона интенсивности пучка ядер ксенона.

Выполнены работы на пучках тяжелых ионов по программам прикладных и физических исследований. Так, в ноябре 2022 года сотрудники комплекса испытали прикладную станцию СОЧИ (Станция Облучения ЧИпов) на ионах аргона. Специалисты облучили тестовые образцы конструкционных материалов, ядерные фотоэмульсии и пластинку CR-39 релятивистскими ядрами ксенона. Участники работ измерили спектры в оптическом диапазоне переходного и черенковского излучения при прохождении релятивистского пучка ксенона через тонкую алмазную мишень под разными углами, что в дальнейшем позволит создать новый детектор состава и энергии пучков ионов в энергетическом диапазоне Нуклотрона.

Подготовлена к работе установка BM@N. На двух энергиях, 3.9 и 3 ГэВ на нуклон на ней набрана значительная статистика – более полумиллиарда событий.

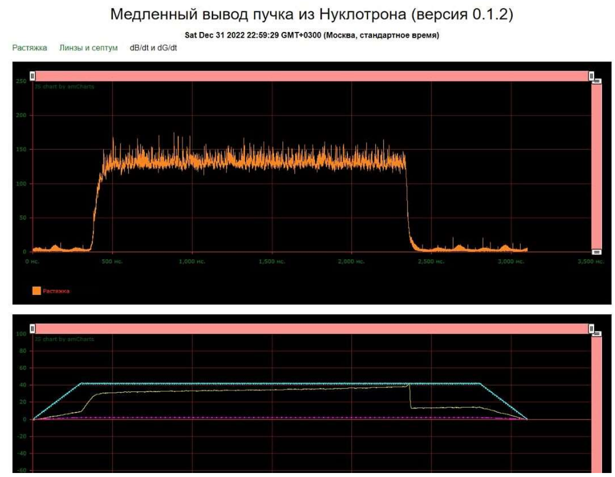


Рис 14: Медленный вывод пучка из Нуклотрона.

Рис 15: Набранная статистика событий в ходе 4 сеанса пуско-наладочных работ на комплексе NICA

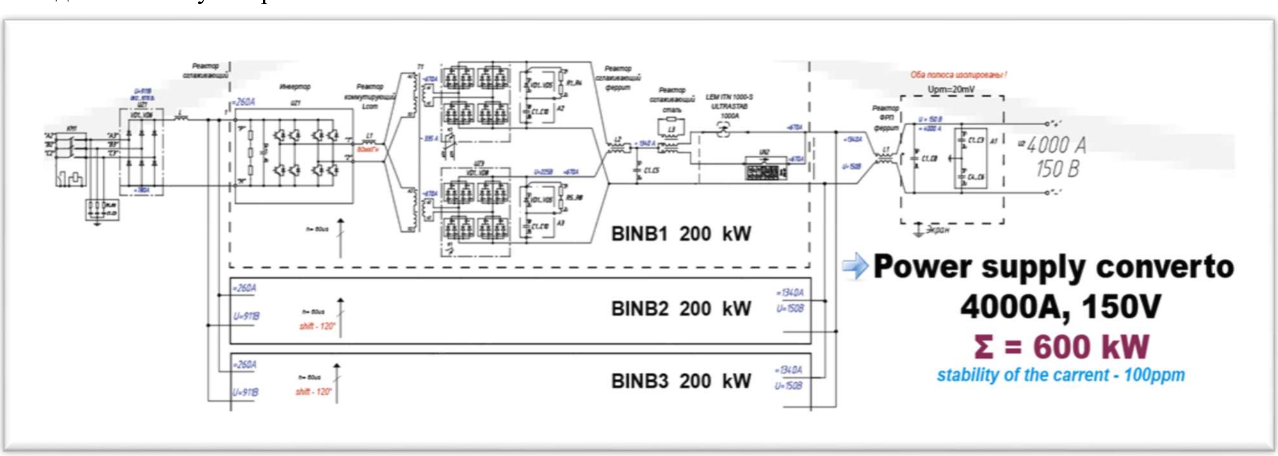


Рис 16: Прецизионный источник питания от ЛМ-ИНВЕРТЕР ИП-4000-150. Суммарная выходная мощность 600кВт. Стабильность выходного тока не хуже 100ppm.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ed. I. Meshkov, G. Trubnikov, Technical Project of NICA Acceleration Complex. JINR, Dubna, Russia, 2015.

[2] V. D. Kekelidze et al., “Three stages of the NICA accelerator complex”, Eur. Phys. J. A, vol. 52:211, p. 390, 2016. doi:10.1088/1742-6596/668/1/012023

[3] A. Eliseev et al., “Results of the Nuclotron upgrade program”, in Proc. IPAC’11, San Sebastián, Spain, Sep. 2011, paper WEPS013, pp. 2508-2510.

[4] E. Syresin et al., “Nuclotron development for NICA acceleration complex”, in Proc. IPAC’19, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 3396-3398. doi:10.18429/JACoWIPAC2019-THXXPLM1

[5] A. Tuzikov et al., “Booster Synchrotron at NICA Accelerator Complex”, in Proc. RuPAC’16, St. Petersburg, Russia, Nov. 2016, pp. 160-162. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2016-FRCAMH05

ЭТАПЫ И ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ИТОГИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УСКОРЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Гудаев Ш.Д., Кораблев С.А., Михайлов Е.С., Паршутина Д.Н., Плузян К.Г., Шевченко В.В.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

В работе представлены промежуточные итоги разработки современного программного обеспечения для моделирования процессов формирования и ускорения сильноточных пучков электронов. Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика. Этап 2023-2025»).

Проведен сравнительный анализ существующих программ, предназначенных для моделирования сильноточной ускорительной техники.

Выявлены и проанализированы современные методы и подходы к разработке программ данного класса. Рассмотрено множество методов прямого кинетического моделирования пучков заряженных частиц. Выбран метод частиц в ячейках, который дополнен граничными условиями электродинамики.

Обозначена проблематика задач подобного типа с точки зрения вычислительной сложности, рассмотрены актуальные подходы к распараллеливанию задач на различных типах устройств.

По результатам сравнительного анализа сформированы и представлены технические требования к программному обеспечению, реализующему ресурсоёмкие вычисления в области ускорительной техники. Предложена концепция модульной архитектуры программного обеспечения, выделены и описаны основные этапы разработки. Определены основные алгоритмы, реализуемые в каждом модуле.

Ведутся работы по проектированию, отладке и тестированию модулей аксиально-симметричной и трехмерной расчетных программ переноса пучков заряженных частиц. Представлены результаты программной реализации модуля параметрического описания задачи, модуля построения геометрических объектов и конечно-разностной сетки расчетной области.

Приведен краткий обзор средств разработки и отладки программ, используемых при реализации модулей программы.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений научной программы Национального центра физики и математики (НЦФМ) является развитие физики и технологии ускорителей нового поколения.

На всех этапах проектирования, эксплуатации и модернизации данных ускорителей становятся актуальными задачи физически корректного моделирования процессов формирования и ускорения заряженных частиц, их взаимодействия с элементами конструкции. Создание программного обеспечения для численного моделирования процессов формирования и ускорения сильноточных пучков электронов является одной из задач научной программы НЦФМ.

Перед разработкой программного обеспечения необходимо выбрать один из рассмотренных методов описания системы заряженных частиц, который впоследствии будет реализован.

МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Описание эволюции заряженных частиц в ускоряющей структуре возможно с помощью матричного или кинетического метода [1].

При применении матричного метода элементы ускоряющей структуры выражаются в виде матриц передачи. Уравнения движения частиц через ускоряющую структуру приобретают вид результирующей матрицы, равной перемножению матриц передачи. Недостатком метода является невозможность учета влияния пространственного заряда на динамику частиц, поэтому метод применяют в основном для циклических ускоряющих структур.

К кинетическим методам описания системы заряженных частиц относят методы интегрирования бесстолкновительного уравнения Власова (1), которое рассматривает фазовое пространство как сплошную среду [0]

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\frac{\vec{v}}{c}\frac{\partial f}{\partial \vec{r}}+\vec{F}\frac{\partial f}{\partial \vec{p}}=0, \qquad (1)$$

где $f=f\left(\vec{r},\vec{p},t\right)$ - одночастичная функция распределения скоростей и координат,

t - время, с;

$\vec{v}$ - скорость частицы, м/с;

c =2,9979·10^8 - скорость света, м/с;

$\vec{r}$ - радиус-вектор частицы, м;

$\vec{F}$ - сила Лоренца, Н;

$\vec{p}$ - импульс частицы, кг·м/с.

Кинетическое уравнение (1) нелинейно, так как входящая в него сила Лоренца определяется полем, которое зависит от функции распределения $f(\vec{r},\vec{p},t)$. Применение данного метода требует сохранения функции распределения скоростей в каждый момент.

Для одномерных задач применим метод «водяного мешка». В этом методе непрерывная функция распределения $f(\vec{r},\vec{p},t)$ в каждый момент времени аппроксимируется областями постоянного фазового объема с подвижными границами. Эволюция системы описывается изменением границ данных областей. На начальных этапах моделирования, когда границы относительно несложные, решение кинетического уравнения по методу «водяной мешок» отличается высокой скоростью счета и требует незначительного объёма оперативной памяти. Однако, с развитием тонкой структуры функции распределения границы областей все более усложняются и необходимо рассматривать дополнительные точки на границах, что приводит к необходимости перестройки модели в процессе расчета и увеличению вычислительной сложности.

Для моделирования стационарных состояний бесстолкновительных заряженных пучков используют метод «трубок тока». Предполагается, что частицы, вылетающие с некоторого участка площади инжектора, образуют элементарную трубку тока до эмиттера. Стационарная конфигурация бесстолкновительного заряженного пучка и соответствующее ей стационарное поле описываются с помощью итерационного решения уравнения Пуассона в узлах сетки. Сильный объемный заряд может привести к запиранию отдельных трубок тока, то есть к развороту частиц у инжектора. В результате сходимость итераций нарушается, поэтому метод «трубок тока» имеет ограниченное применение в задачах сильноточной электроники.

При использовании дискретизации распределения скоростей частиц в трехмерном варианте 20×20×20, то есть по 20 значений скорости на измерение, необходимо хранить $8\cdot10^3$ значений. Расчетная область так же подвергается дискретизации по пространству. При дискретизации расчетной области по пространству 100×100×100, для каждого момента времени необходимо хранить в памяти уже $8\cdot10^9$ значений. При хранении данного количества значений на ЭВМ с двойной точностью потребуется ≈60 Гб оперативной памяти. Схема интегрирования уравнения Власова (1) зависит, по крайней мере, от одного временного буфера, что удваивает требования к объему оперативной памяти. По этой причине, современные расчетные программы не используют метод прямого интегрирования уравнения Власова (1) для протяженных структур в трехмерной постановке.

Идея метода «частиц-в-ячейках» заключается в предельном переходе от микроскопической функции распределения плотности частиц к макроскопической функции распределения путем сглаживания. Систему точечных частиц можно представить в виде набора групп близко расположенных в фазовом пространстве по координатам точечных частиц [2]. Каждая такая группа, называемая «макрочастицей», имеет определенную форму и массу, определяемую суммой масс элементарных частиц в её составе. В дальнейшем изложении «макрочастицы» будем именовать частицами. В основе метода используются основные уравнения Максвелла и уравнение движения.

Преимуществом метода «частиц-в-ячейках», по сравнению с прямым методом интегрирования кинетического уравнения (1), является допустимая вычислительная сложность расчета в трехмерной постановке задачи. Метод «частиц-в-ячейках» реализован в множестве расчетных программ, рассмотренных далее, и выбран в качестве основного при разработке программы для моделирования динамики электронов в сильноточной технике.

Программа «WARP»

Программа «WARP» [3], реализующая метод «частиц-в-ячейках», разработана командой института Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) в 2000 году для моделирования сильноточных пучков частиц и плазмы. В программе реализованы физические модели для расчета ускорительной техники, плазмы и лазерного излучения.

Программа «WARP» используется в широком спектре задач, таких как:

- проектирование сильноточных индукционных ускорителей;
- захват и ускорение протонных пучков лазерным излучением;
- кильватерное ускорение частиц.

Пользовательский интерфейс программы предоставляет универсальные возможности описания параметров задачи путем выбора из доступных опций, не требуя модификации или перекомпиляции исходного кода программы.

При настройке моделирования предоставлен выбор опций для вычисления полей и движения частиц. Возможно указать начальное распределение частиц, определить параметры огибающей пучка, учесть вторичную эмиссию или неупругое столкновение частиц. Доступны опций для симуляции задачи в электростатической, магнитостатической или электродинамической постановке.

Программа поддерживает параллельное выполнение с использованием библиотеки MPICH [4] и может быть запущена на многоядерных системах.

Поддержка программы в настоящее время затруднена, поскольку код программы разработан на языке программирования Fortran-90 в процедурной парадигме программирования и имеет неполноценную документацию по реализованным функциям и возможностям. Ввиду этого команда института LBNL разрабатывает программу «WARPX».

Программа «WARPX»

Программа «WARPX» [1] предназначена для моделирования задач ускорительной техники и физики плазмы на современных высокопроизводительных вычислительных системах. Реализована данная возможность через стороннее программное обеспечение «PICSAR» [5], которое позволяет распараллелить расчетные программы, основанные на методе «частиц-в-ячейках».

Второстепенный функционал программы реализован через открытое программное обеспечение «AMREX» [6], которое позволяет осуществить: ввод параметров задачи, построение геометрии, уточнение сеточных границ, вывод данных моделирования. Данное решение позволило разработчикам сфокусироваться на разработке специализированных расчетных модулей для различных предметных областей.

Таким образом, программа «WARPX» представляет из себя набор функциональных модулей в отличие от монолитной архитектуры программы «WARP». Поскольку основные области двух программ идентичны приведем только основные отличия:

- добавлена возможность выбора абсорбционных граничных условий;
- реализованы новые концепции моделирования современных ускорителей с кильватерным ускорением, применяя модели магнитогидродинамики;
- разработан модуль для количественной оценки производительности микроэлектроники, основанный на совместном решении уравнений Максвелла с уравнениями, описывающими квантовое поведение материалов.

«WARPX» разрабатывается в виде открытого проекта на языке программирования C++ в объектно-ориентированной парадигме, что позволяет быстро внедрять в команду новых разработчиков и получать обратную связь от пользователей.

Программа «BEAM25»

Программа «BEAM25» [7] разработана институтом ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в 2002 году для решения задач, возникших при разработке безжелезных линейных ускорителей.

Программа «BEAM25» предназначена для моделирования нестационарных электромагнитных процессов в аксиально-симметричных конструкциях, состоящих из элементов с различными электрическими свойствами (диэлектрическая и магнитная проницаемости, проводимость), а также процессов формирования, ускорения и транспортировки сильноточных релятивистских электронных пучков. В программе, в цилиндрической системе координат самосогласованным образом решается система уравнений Максвелла и уравнения движения заряженных частиц.

Уравнения Максвелла решаются на прямоугольной неравномерной сетке. Для решения используется разностная схема с перешагиванием со вторым порядком точности относительно пространственных и временных шагов. Уравнения аппроксимируются центральными разностями по каждой координате с учетом аксиальной симметрии. Уравнение движения частиц интегрируется методом перешагивания по алгоритму Бориса, который использует разделение электрических и магнитных сил. Распределение заряда частицы по узлам пространственной сетки для вычисления плотностей заряда и токов, а также определение силы, действующей на частицу, осуществляется с помощью модели «облаков-в-ячейках».

В состав программы «BEAM25» входит 2 основных модуля:

- модуль построения геометрии расчетной области, сеточная аппроксимация границ и областей объектов, определение электрических свойств материалов;
- расчетный модуль и вывод результатов моделирования.

Программа «BEAM25» разработана на языке программирования Fortran-90 в процедурном стиле, что значительно усложняет её поддержку. Программа применялась для моделирования переходных процессов в формирующих системах на линиях с распределенными параметрами, решения задач формирования и транспортировки сильноточных электронных пучков в линейных индукционных ускорителях.

Программа «PIConGPU»

Программа «PIConGPU» [8] является научным проектом института Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf. Цель разработки программы заключается в астрофизических исследованиях и изучении лазерно-плазменных взаимодействий. Физическая модель метода «частиц-в-ячейках» была дополнена физическими моделями фотонной эмиссии и полевой ионизации вещества.

Основной особенностью программы являются алгоритмы и структуры данных, оптимизированные для использования на высокопроизводительных вычислительных системах с графическими ускорителями. Графические ускорители обеспечивают аналогичную производительность многоядерных систем при значительно меньших материальных затратах, но требуют специалистов узкого профиля. Недостатком программы является специализация только на графических ускорителях одной компании, что ограничивает распространение программы.

Программа предлагает широкий спектр инструментов диагностики:

- дальнего поля для когерентного и некогерентного излучения заряженных частиц;
- визуализация полей в процессе расчета;
- многопоточный ввод/вывод данных.

Модульная архитектура программы позволяет выбирать различные расчетные схемы и физические модели при задании параметров симуляции через интерфейс пользователя. Код программы разработан на языке программирования C++ в объектно-ориентированной парадигме с использованием технологии вычисления во время компиляции.

ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ

Несмотря на множество разрабатываемых программ подобного класса, не существует универсального инструмента для различных задач ускорительной техники. При этом доработка существующей программы по сложности сравнима с полноценной разработкой новой. В связи с этим принято решение разработать собственную программу для проектирования ускорительной техники в рамках НЦФМ.

Руководствуясь современной практикой разработки подобных программ, таких как «WARPX» и «PICONGPU», целесообразно выбрать архитектуру программы, состоящую из функциональных модулей. Данное решение позволит распределить работу на несколько команд и предоставит возможность повторного использования данных модулей.

На первом этапе разработки программы сформулированы технические требования:

1. Программа должна моделировать методом «частиц-в-ячейках» процессы формирования и распространения сильноточных пучков заряженных частиц при наличии ускоряющего импульса напряжения в аксиально-симметричной и трехмерной постановках задачи.
2. Программа должна состоять из независимых в реализации функциональных модулей, позволяющих моделировать:

- формирование мощных наносекундных электромагнитных полей в устройствах на основе линий с распределенными параметрами;
- эмиссию электронов в сильноточных вакуумных диодах и передающих линиях;
- ускорение, транспортировку и фокусировку сильноточного релятивистского электронного пучка;
- вторичную эмиссию, отражение и поглощение электронов на составных элементах исследуемых структур.

3. Функциональные модули программы должны разрабатываться итерационно и независимо друг от друга.
4. Функциональные модули программы, обладающие значительной вычислительной сложностью, должны быть разработаны в последовательном и параллельном режиме вычислений.

Согласно требованию №2 метод «частиц-в-ячейках» должен быть дополнен граничными условиями электродинамики и эмиссии частиц. Процессы формирования, отражения и поглощения электромагнитных волн в структуре описываются с помощью абсорбционных и возбуждающих граничных условий. Эмиссионная поверхность является граничным условием с заданными параметрами инжекции частиц.

На втором этапе разработки определены основные функциональные модули программы. Архитектура программы с взаимодействием между модулями представлена на рисунке 0, в таблице 1 указано функциональное назначение каждого модуля.

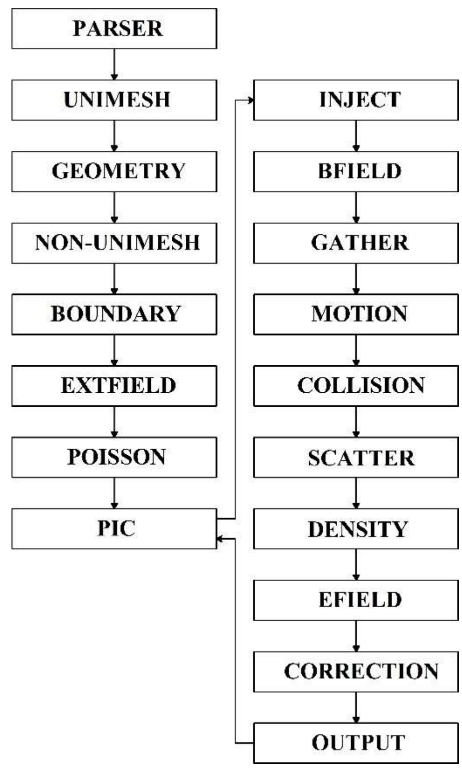


Рисунок 1: Архитектура программы.

На третьем этапе разработки модули PARSER, UNIMESH, GEOMETRY реализованы на языке программирования C++.

Модуль PARSER позволяет параметрически описать задачу в текстовом файле с помощью принятого синтаксиса. Ввод данных должен соответствовать разделам, предназначенным для определенного блока информации. Предусмотрены разделы для описания геометрии расчетной области, свойств материалов, граничных условий, внешних электрических и магнитных полей, источников эмиссии и др.

Модуль GEOMETRY предназначен для построения геометрических объектов в расчётной области с помощью комбинации примитивов, заданных квадратичными формами различных поверхностей.

Таблица 1: Функциональное назначение модулей программы

Модуль	Функциональное назначение
PARSER	Ввод параметров задачи из файла конфигурации
UNIMESH	Инициализация расчетной области и покрытие ее равномерной сеткой
GEOMETRY	Построение в расчетной области геометрических объектов
NON-UNIMESH	Переопределение равномерной расчетной сетки на неравномерную с учетом электромагнитных свойств материалов
BOUNDARY	Выделение граничных узлов расчетной области и между объектами
EXTFIELD	Задание внешних электрических и магнитных полей в виде аналитического выражения или массива данных
POISSON	Решение уравнения Пуассона (в частном случае уравнения Лапласа) при задании потенциалов на границах или объектах
PIC	Основной цикл, моделирующий расчетную область в течении заданного количества временных шагов
INJECT	Инжекция частиц в расчетную область
BFIELD	Вычисление магнитного поля
GATHER	Интерполяция характеристик поля на частицы
MOTION	Решение уравнения движения частиц
COLLISION	Учет взаимодействия частиц с окружающей средой
SCATTER	Распределение заряда частиц в узлы сетки
DENSITY	Расчет плотности тока и заряда в узлах сетки
EFIELD	Расчет обновленного электрического поля
CORRECTION	Корректировка обновленного электрического сглаживанием
OUTPUT	Вывод на экран и сохранение состояния в контейнер данных

Модуль UNIMESH выполняет функцию разбиения расчетной области на равномерную декартовую сетку. В узлах сетки аппроксимируются построенные геометрические объекты.

На рисунке 1 изображен полый цилиндр, построенный с помощью трех вышеописанных модулей.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ

Размер сильноточных линейных индукционных ускорителей составляет порядка десятков метров. Физически корректное моделирование подобных протяженных ускорительных структур за допустимое время счета требует вычислительных ресурсов, превышающих возможности стандартных ЭВМ. В мировой практике для подобных задач используют высокопроизводительные кластерные системы. Взаимодействие с кластерными системами предъявляет требования к дополнительному функционалу программы, а именно необходимо определить стратегию декомпозиции расчетной области и алгоритмы взаимодействия между её частями.

С точки зрения балансировки нагрузки между вычислительными узлами равномерная декомпозиция расчетной области оптимальна для решения уравнения Пуассона и системы уравнений Максвелла, поскольку в каждой области содержится примерно равное количество неизвестных. Для интегрирования движения частиц равномерная декомпозиция расчетной области не является оптимальной, потому что заряженные частицы в ускорителе движутся сгруппировано в центральном канале. Следовательно, количество частиц сконцентрировано в локальных областях, которые изменяют свое положение во времени.

Архитектура современных кластерных систем может быть построена на основе графических ускорителей. Графические ускорители содержат особый тип текстурной памяти, которая оптимизирована для инструкций с однотипными данными. В отличие от современных процессоров, графические ускорители содержат на несколько порядков больше тензорных ядер. Ядра графического ускорителя работают с меньшей тактовой частотой, чем ядра процессора, но за счет разницы в количестве, перенос вычислений на графический ускоритель может значительно сократить время счета.

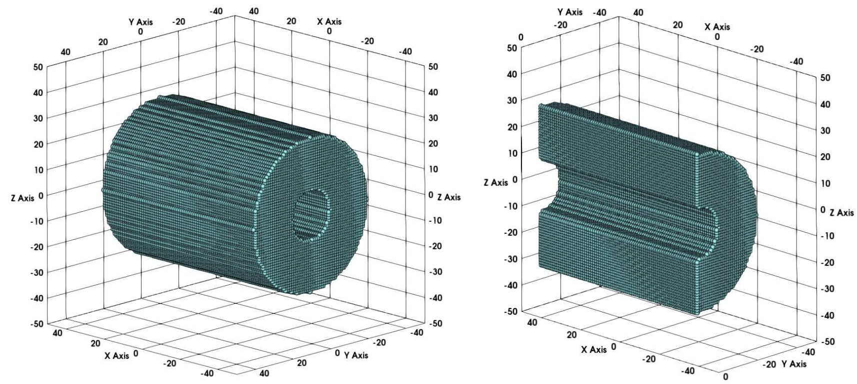


Рисунок 1 – Полый цилиндр, построенный с помощью модулей PARSER, GEOMETRY, UNIMESH

Архитектура графических ускорителей ориентирована на исполнение алгоритмов, в которых элементы входных массивов обрабатываются одинаковым образом независимо друг от друга. В методе «частиц-в-ячейках» при интерполяции заряда частиц или характеристик поля происходит обмен данными между подвижными частицами и неподвижной сеткой. При вылете частицы в соседний домен, данные которого расположены в памяти на другом графическом ускорителе, происходит обмен данными между графическими ускорителями через оперативную память вычислительного устройства. Перечисленные операций обмена данными с доступом к памяти приводят к значительной задержке вычислений во времени.

В результате невозможно определить единую стратегию для множества задач ускорительной техники, поэтому ответственность за декомпозицию задачи и балансировку вычислительной сложности следует делегировать отдельному модулю.

ИНСТРУМЕНТЫ РАЗРАБОТКИ И ОТКЛАДКИ

На первых итерациях проектирования функциональных модулей для получения промежуточных результатов в короткие сроки использованы сторонние инструменты разработки:

1. Библиотека Boost.Spirit [9] для парсинга конфигурационного файла;
2. Библиотека Boost.Multiarray [9] для интерфейса многомерных структур данных;
3. Библиотека Boost.Test [9] для тестирования функциональных модулей;
4. Программа Paraview [10] для визуализации расчетной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Wu Chao A., Mess K.H., Tigner M., Zimmermann Fr., Handbook of Accelerator Physics and Enginnering. Singapore:World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2013.

[2] А.С. Рошаль. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.

[3] Overview of the BLAST, https://blast.lbl.gov/codes

[4] MPICH is a high performance and widely portable implementation of the Message Passing interface standard https://mpich.org

[5] PICSAR is a library of modular physics routines for PIC codes, https://github.com/ECP-WarpX/picsar

[6] AMREX: Software Framework for Block Structured ARM, https://amrex-codes.github.io/amrex

[7] V.S. Gordeev, E.S. Mikhailov, "BEAM25 program for numerical simulation of the processes of high-current electron beam shaping acceleration and transportation", *VANT*, No.5, p.30-32, 2001.

[8] PIConGPU – A heterogeneous particle-in-cell code, https://www.hifis.net/spotlights/picongpu

[9] Boost C++ Libraries, https://www.boost.org

[10] Paraview, https://www.paraview.org

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКЦИИ ^{7}Li(d,n)^{8}Be*

Т. А. Быков, Г.Д. Верховод, С.Ю. Таскаев,
Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия,
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация

В ИЯФ СО РАН для проведения перспективной методики лечения злокачественных опухолей предложен и создан ускорительный источник нейтронов на основе нового типа ускорителя заряженных частиц - ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией. На ускорителе получают пучок протонов или дейтронов с широким диапазоном тока от 1 нА до 10 мА и энергии от 0,6 до 2,2 МэВ и генерируют нейтроны с различным спектром – холодные, тепловые, эпитепловые, надэпитепловые, моноэнергетические и быстрые.

С использованием литиевой мишени толщиной 88 мкм был измерен спектр быстрых нейтронов реакции ^{7}Li(d,n)^{8}Be при энергиях пучка дейтронов от 1 до 2 МэВ. Для измерения спектра был использован спектрометр-дозиметр нейтронного γ-излучения UNSD-15 Mobile (ООО "Центр АЦП"). В ходе исследований была проведена калибровка оборудования и измерен спектр быстрых нейтронов на расстоянии 2 и 5 метров от литиевой мишени вдоль оси пучка нейтронов.

В работе представлены результаты измерений в виде графиков энергетического спектра быстрых нейтронов, а также выводы о проведении дальнейшего изучения спектра реакции ^{7}Li(d,n)^{8}Be и его углового распределения.

ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия является перспективным методом для лечения злокачественных опухолей. Он обеспечивает избирательное разрушение опухолевых клеток путем предварительного накопления внутри них стабильного бора-10 и последующего облучения эпитепловыми нейтронами. В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с выделением энергии в ячейке.

Для БНЗТ в Институте ядерной физики СО РАН был предложен и разработан оригинальный ускорительный источник нейтронов. Источник нейтронов состоит из трех основных блоков: 1) электростатического тандемного ускорителя протонов оригинальной конструкции (тандемный ускоритель с вакуумной изоляцией) для получения стационарного пучка протонов с энергией до 2,3 МэВ и током до 10мА.; 2) литиевая мишень для генерации протонов в пороговой реакции ^{7}Li(p,n)^{7}Be; и 3) система генерации пучка терапевтических нейтронов для формирования пучка надтепловых нейтронов для терапии. Установка показана на Рис. 1.

Еще одной особенностью ускорительного источника VITA является возможность генерации не только эпитепловых нейтронов, но также и пучка дейтронов. Это дает множество возможностей для научных исследований, в том числе изучение спектра быстрых нейтронов реакции ^{7}Li(d,n)^{8}Be

Для измерения энергетического спектра нейтронов реакции ^{7}Li(d,n)^{8}Be в лаборатории БНЗТ ИЯФ используется спектрометр-дозиметр UNSD-15 Mobile (НИЦ «Курчатовский институт», ООО «Центр АЦП»). В состав оборудования входит детектор быстрых нейтронов и гамма-излучения, малогабаритный промышленный компьютер со встроенным в него блоком высокочастотного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и блоком питания для высоковольтного модуля детектора (Рисунок 2.). Технические характеристики представлены на Рисунке 3.

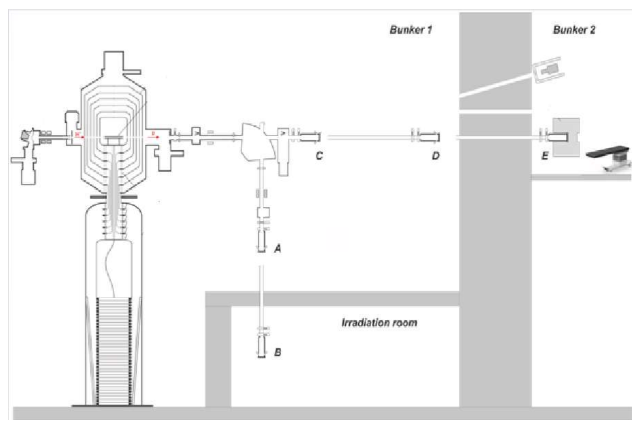


Рисунок 1: Схема экспериментальной установки.

Рисунок 2: Комплект спектрометра (мобильный автономный вариант).

Параметр	Типовое значение	Фактическое значение
Энергетический диапазон измерения нейтронного излучения	0.025 эВ – 15 МэВ	0,025 эВ – 15.4 МэВ
Энергетический диапазон измерения гамма-излучения	50 кэВ – 8 МэВ	100 кэВ – 8.5 МэВ
Диапазон измерения мощности эффективной дозы смешанных гамма-нейтронных полей	~ $(2.0{*}10^{-1}{\div}3.0{*}10^{3})$ мкЗв/час	~ $(2.0{*}10^{-1}{\div}3.0{*}10^{3})$ мкЗв/час
Коэффициент блокировки гамма-квантов	Не менее 1000 при рабочей загрузке и диапазоне каналов 20÷1024	Не менее 1000 при рабочей загрузке и диапазоне каналов 27÷1024
Рабочая загрузка спектрометра	Не более $5{*}10^{3}$ импульсов/с	Не более $22{*}10^{3}$ импульсов/с
Энергетическое разрешение спектрометра по ^{239}Pu-Be	Менее 10 %	5 %
Ширина канала спектрометра в энергиях электрона	~0.0075 МэВ/канал	~0.00825 МэВ/канал

Рисунок 3: Технические характеристики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В марте 2023 года были проведены эксперименты по измерению энергетического спектра быстрых нейтронов реакции ^{7}Li(d,n)^{8}Be. В результате планирования эксперимента было решено разместить детектор на расстоянии 4м за бетонной стеной толщиной 1,5м (Рисунок 4.). Энергия пучка дейтронов во время измерения составляла 1 МэВ, ток пучка- 2 мкАч. Результаты измерений представлены на Рисунке 5.

Рисунок 4: Ускорительный тракт (рисунок слева), расположение детектора (рисунок справа).

Рисунок 5: Спектр быстрых нейтронов.

Из графика видны пик энергетического спектра при 12,5 МэВ, возможный пик при 3 МэВ, сглаженный обработкой, а также возможный пик при энергии 16 МэВ или более. Из полученных результатов видно, что некоторые области спектра “не прорисованы” (пунктирные области графика на Рисунке 5). Это связано с недостаточной статистикой в данных диапазонах энергий. Для получения качественного результата было принято решение изменить конфигурацию эксперимента и переместить детектор на расстояние 2м от литиевой мишени. Полученные графики для разных энергий представлены на Рисунке 6.

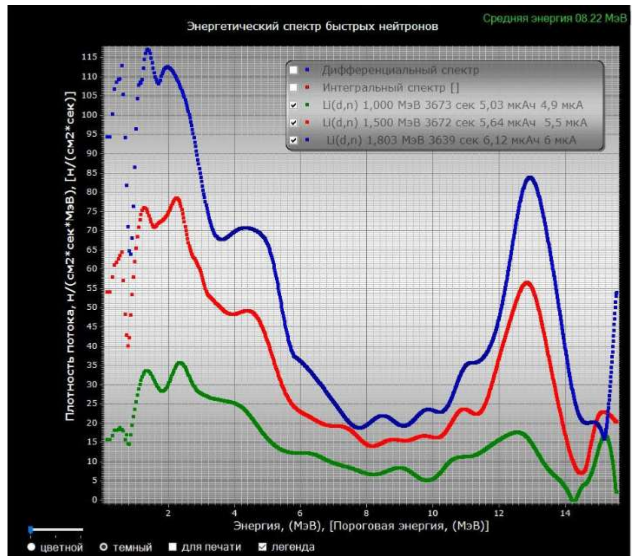


Рисунок 6: Спектры быстрых нейтронов на расстоянии 2 метра от литиевой мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН предложен и разработан ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, обеспечивающий получение мощного стационарного пучка протонов или дейтронов с энергией, изменяемой в диапазоне от 0,3 до 2,3 МэВ, с током, изменяемым от 0,5 до 10 мА. Пучок ионов отличает высокая монохроматичность и стабильность энергии (0,1 %) и высокая стабильность тока (до 0,4 %). На выходе из ускорителя пучок ионов имеет диаметр 10 ± 1 мм, угловую расходимость $\pm 1{,}5$ мрад, нормализованный геометрический эмиттанс $\varepsilon_{norm} = 0{,}2$ мм·мрад.

В результате серии экспериментов на ускорителе БНЗТ ИЯФ были получены спектры нейтронов быстрых реакций на расстоянии от двух до четырех метров от литиевой мишени. После сравнения полученных данных с теоретическими было принято решение провести дальнейшие исследования спектра реакции в расширенном диапазоне энергий спектрометра до 20 МэВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19 72 30005, https://rscf.ru/project/19-72-30005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] S. Taskaev *et al.*, “Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target”, *Biology*, vol. 10, 350, 2021. doi: 10.3390/biology10050350

[2] G. Verkhovod, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, I. Shchudlo, T. Sycheva, S. Savinov, S. Taskaev. *Verification of a beam of epithermal neutrons for boron-neutron capture therapy.* Proc. of the XXVII Russian Particle Accelerator Conference, Alushta, Russia, September 26th - October 2st, 2021, MOPSA47.

[3] M. Ahmed *et al.* (Eds.), *Advances in Boron Neutron Capture Therapy*. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, June 2023. ISBN: 978-92-0-132723-9

[4] S. Taskaev *et al.*, “Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target”, *Biology*, vol. 10, 350, 2021. doi: 10.3390/biology10050350

[5] Д.А. Касатов и др., “Регистрация тока, сопутствующего ионному пучку в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией”, *Письма в ЖТФ*, том 41, стр. 74-80, 2015. doi: 10.1134/S1063785015020078

[6] Д.А. Касатов и др., “Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени”, *ПТЭ*, № 5, стр. 5-9, 2020. doi: 10.31857/S0032816220050158

[7] Konstantin V. Mitrofanova , Vladimir M. Piksaikin, Konstantin I. Zolotarev, Andrey S. Egorov, and Dmitrii E. Gremyachkin. *The energy spectrum of neutrons from 7Li(d,n)8Be reaction at deuteron energy 2.9 MeV.* EPJ Web of Conferences 146, 11041 (2017).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПРОПИТОЧНОГО ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА ДО 50 МГр

М.В. Петриченков[†], А.Ф. Бродников, $\boxed{\text{В.Я. Чудаев}}$, В.В. Экста, Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация

Проведены исследования радиационной стойкости пропиточного эпоксидного компаунда, производства ИЯФ СО РАН до значений доз 50 МГр с целью определения возможности замены компаунда из SLAC National Accelerator Laboratory (США) в производстве магнитов для ускорителей заряженных частиц. Образцы компаунда облучались электронным пучком, генерируемым на ускорителе ИЛУ-6 производства ИЯФ СО РАН. Температура образцов контролировалась непосредственно в процессе облучения под пучком. Приведены результаты механических испытаний (предел прочности и модуль Юнга) после облучения в сравнении с компаундом SLAC. Возможность замены компаунда производства SLAC на отечественный была подтверждена экспериментально.

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ

Основными показателями, характеризующими необратимые изменения для механических свойств полимерных материалов являются предел прочности, модуль упругости, предел деформируемости [1]. Необратимые изменения в облученных материалах определяются установлением равновесия между генерацией нестабильных продуктов радиолиза и их гибелью, в зависимости от мощности дозы.

Литературные данные дают большой разброс в результатах, см. Таблицу 1 в которой приведена часть данных из [1], поскольку радиационная стойкость материалов может существенно зависеть от конкретных условий их изготовления и испытаний [2].

ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

В качестве источника ионизирующего излучения выбран ускоритель ИЛУ-6 (импульсный линейный ускоритель), ранее разработанный в ИЯФ СО РАН. Импульсный характер пучка позволяет легко адаптировать ИЛУ к технологическим процессам, требующим создания зоны облучения сложной конфигурации (для кабельной продукции и др.).

Параметры работы ИЛУ-6 в экспериментах по облучению образцов приведены в Таблице 2 (см. также [2]). Для облучения образцов в результате экспериментов была выбрана частота повторения рабочих импульсов пучка 5 Гц (ускоритель ИЛУ-6 допускает до 25 Гц), при которой использованное воздушное охлаждение было достаточно эффективным для поддержания температуры образцов ниже 50°С, в отличие от 70°С в экспериментах, проведенных ранее в [2]. Температура образцов 42÷47°С оказывает меньшее влияние на механические параметры образцов, содержащих органические вещества в своем составе.

Для дозиметрии использовались радиохромные дозиметрические пленки производства «GEX Corporation». Проведены подбор режима работы ускорителя – параметров пучка электронов, проверена равномерность распределения дозы в зоне облучения в диапазоне до 0,1 МГр. Размещение образцов показано на Рис. 1.

Таблица 1: Минимальные уровни облучения, вызывающие заметные (20-30 %) изменения свойств некоторых материалов [1]

Органические материалы	**Доза γ-излучения, МГр**
Фенольная смола с наполнителем из стекловолокна	30÷100
Фенольная смола с асбестовым наполнителем	1÷30
Полиэфир с наполнителем из стекловолокна	10÷30
Эпоксидная смола	1÷20
Майлар	0,2÷2
Полиэфирная смола без-наполнителя	0,003÷0,01

Таблица 2: Параметры работы ИЛУ-6 в экспериментах по облучению образцов

Энергия пучка электронов, МэВ	2,4
Импульсный ток, мА	330
Средний ток, мА	1,07
Частота импульсов (циклов), Гц	5
Зона облучения, см^2	15x100
Мощность дозы, Гр/импульс.	≈ 113
АСУ ускорителя обеспечивает:	
Погрешность набора дозы	- не более 10%
Воспроизводимость режима с погрешностью	- не более 2%
Результирующая погрешность дозы	- не более 20%
Температура образцов	42÷47°С

† M.V.Petrichenkov@inp.nsk.su

Рис. 1: Размещение образцов под воздушным охлаждением. Используются металлические крепления.

Облучение проводилось дозами: 0,1; 1; 5; 10; 50 МГр.

ТЕРМОКОНТРОЛЬ

Для контроля температуры образцов во время облучения использовался прецизионный многоканальный измеритель температуры **МИТ 8.10,** подключённый к ПК. Регистрация измерений осуществлялась управляющей программой.

Абсолютная погрешность измерений температуры термопреобразователями ХК(L) и МК (T) составляет ± 0,15 ºC.

Термоэлектрические преобразователи: хромель-копель ХК(L) (промышленные в металлической оболочке с Al_2O_3) и медь-константан МК(T) (самодельные из обмоточного провода ПЭШОК, ПЭШОМ в шелковой изоляции, диаметр электродов термопар 0,25 мм). В исследуемых прямоугольных образцах высверливались отверстия диаметром 1 мм, где располагались спаи термопар. Для обеспечения хорошего контакта спая с образцом отверстия заливали эпоксидной смолой с наполнителем Al_2O_3.

Для определения влияния электронного пучка на ТЭДС термопар применялись различные типы и исполнения термопар.

По окончании измерений анализ состояния термопар показал, что электронный пучок не оказал существенного влияния на их внешний вид. Небольшому изменению подверглась шелковая изоляция медь-константановых термопар (около 15 см от спая). Наибольшему изменению подверглись деревянные и карболитовые детали крепежной конструкции образцов, поэтому они впоследствии были заменены на металлические.

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Схема испытаний показана на Рис. 2, использовался трёхточечный метод [3]. Результаты измерений (усредненные) приведены в Таблицах 3, 4.

Модуль упругости при поперечном изгибе (модуль Юнга) E определяется соотношением:

$$E = P \cdot L^3 / 4fbh^3$$

Где, P – приращение нагрузки, b – ширина образца, h – толщина образца, f – приращение прогиба под воздействием P (до ≈ 0,5 от максимального прогиба). Размеры образцов 80x10x3 мм³ и 80x10x2 мм³. Для набора статистики проводилось испытание нескольких образцов (не менее 5 штук [3]) для каждого значения дозы. Облучение проводилось дозами: 0,1; 1; 5; 10; 50 МГр.

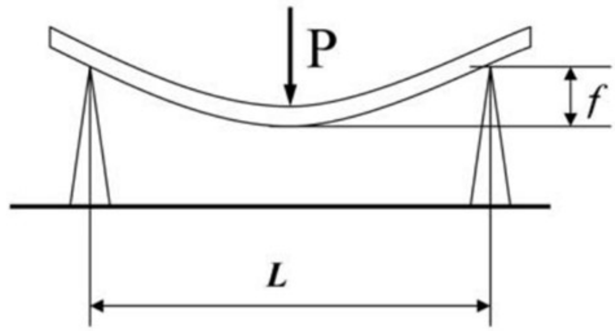


Рис. 2: Схема испытаний.

Предел прочности σ при статическом изгибе равен:

$$\sigma_b = 1{,}5 P_{max} L / bh^2$$

Где P_{max} – усилие, разрушающее образец.

Таблица 3: Результаты измерений модуля Юнга

D, МГр	E, кгс/мм², модуль Юнга			USA
	h = 2 мм	h = 3 мм	<E>	<E>
0,0	595	482	539±56	440
0,1	564	494	529±35	
1,0	607	497	552±55	
5,0	589	522	556±34	
10,0	590	532	561±29	
50,0	611 (2 кг) и 726 (1 кг)	540	626±67	

Таблица 4: Результаты измерений предела прочности

D, МГр	σ_b, кгс/мм², предел прочности			USA
	h = 2 мм	h = 3 мм	<σ_b>	<σ_b>
0,0	12,1	11,3	11.7	11,0
0,1	11,1	10,3	10.7	
1,0	10,3	10,1	10.2	
5,0	8,6	8,1	8.4	
10,0	7,4	7,9	7.7	
50,0	6,4	6,6	6.5	

Наблюдается разница в величине модуля упругости для пластинок с толщиной h = 2 мм и h = 3 мм. Образцы компаунда не отливались, а нарезались при механической обработке, что, по-видимому, по-разному влияет на свойства образцов разной толщины.

Обращает на себя внимание некоторое возрастание усреднённого по образцам значения модуля упругости компаунда собственной разработки ИЯФ СО РАН при одновременном монотонном снижении прочности с увеличением дозы облучения, см. далее Рис. 3,4. В состав компаунда собственной разработки входит электрокорунд белый (примерно половина по весу) в качестве наполнителя.

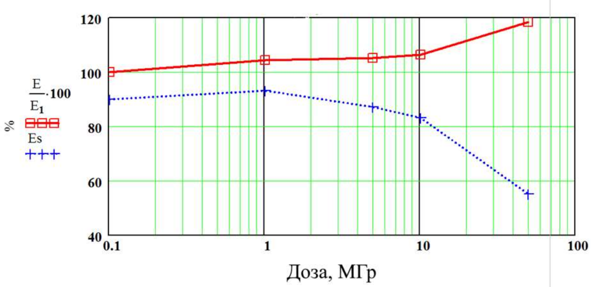


Рис. 3 Дозовая зависимость величины модуля Юнга (в процентах от значения при нулевой дозе) для компаунда собственной разработки (красный график с □) и американского (синий пунктир с «+»). [2]

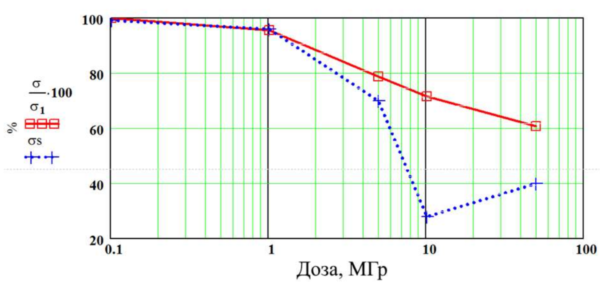


Рис. 4 Дозовая зависимость величины предела прочности (в процентах от значения при нулевой дозе), для компаунда собственной разработки (красный график с □) и американского (синий пунктир с «+»). [2]

РЕЗУЛЬТАТЫ

По итогам экспериментов была подтверждена возможность использования данного компаунда собственного изготовления ИЯФ СО РАН для пропитки обмоток магнитных элементов ускорителей.

ССЫЛКИ

[1] Физическая энциклопедия, https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/4439/РАДИАЦИОННАЯ

[2] В.В. Петров, Ю.А. Пупков, ИСПЫТАНИЯ В ИЯФ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ, Препринт ИЯФ 2010-1, НОВОСИБИРСК, 2010

[3] ГОСТ 25.604-82 “Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах”.

МНОГОЦЕЛЕВОЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЦИКЛОТРОНА Ц–80. ТЕХНОЛОГИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОПУХОЛЕЙ ГЛАЗА И ЕГО ПРИДАТОЧНОГО АППАРАТА В ПРОЕКТЕ «ОКО»

В.И. Максимов, Д.И. Гранин, Ж.С. Лебедева, П.А. Медведев, О.В. Пашков, Кленов Г.И., Черных А.Н., Д.А. Амерканов, С.А. Артамонов, Е.М. Иванов, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова г. Гатчина

В рамках исполнения указа президента РФ от 25 июля 2019 г. № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации» по федеральной научно-исследовательской программе «Синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы» (ФНТП) реализуется научно образовательный медицинский центр ядерной медицины (НОМЦ ЯМ). В «НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ» на циклотроне Ц – 80 для НОМЦ ЯМ реализуются:

- центр протонно-лучевой терапии на горизонтальном пучке для облучения глаза и его придаточного аппарата (проект «ОКО»);
- центр наработки и выделения радионуклидов 68Ge, 82Sr, 225Ac (проект «ИЗОТОП»).

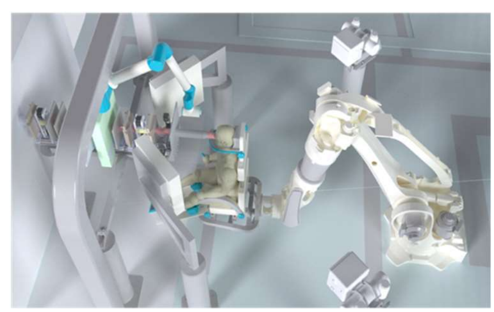
ВВЕДЕНИЕ

«НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ» реализует в рамках ФНТП проекты «ОКО» и «ИЗОТОП» на едином циклотроне Ц-80. Для реализации проектов спроектированы и реализуются два вывода протонных пучков: на 100 мкА (для наработки радионуклидов) и порядка 1 мкА (для облучения опухолей глаза и его придаточного аппарата).

Особенный интерес представляет разработанная технология облучения опухолей глаза и его придаточного аппарата в рамках проекта «ОКО».

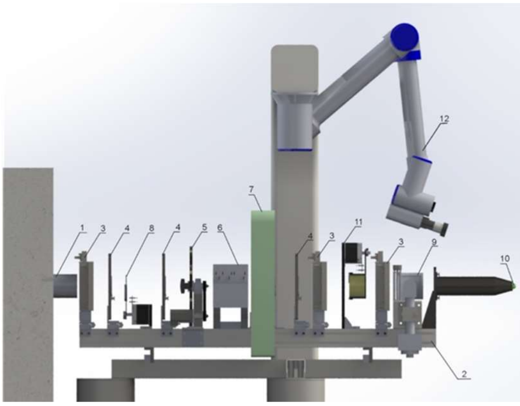
Состав комплекса протонно-лучевой терапии «ОКО»:

1. Устройство для пространственного позиционирования пациентов при лечении онкоофтальмологических заболеваний на протонном пучке (УППП):
   - система позиционирования, в которую входят модуль основания и базовый модуль кресла;
   - устройство для прецизионной фиксации головы (рамка с комплектом масок и МФТ);
   - устройство для верификации положения устройства пространственного позиционирования пациентов в системе координат лучевой установки;
   - устройство для размещения и верификации положения водного фантома;
   - система лазерного позиционирования пациента;
   - система видео позиционирования пациента;
   - АСУ системы позиционирования.

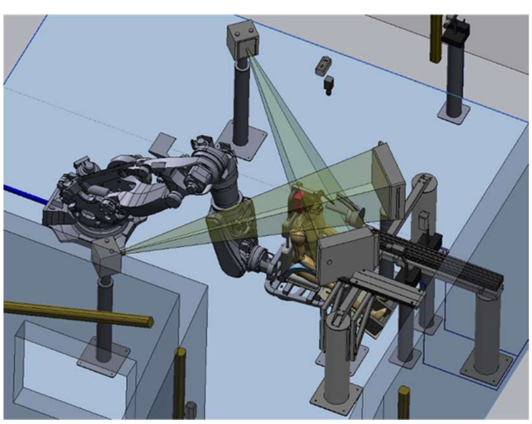


2. Устройство формирования и контроля пучка (УФКП):
   - оптическая скамья;
   - система формирования индивидуальных дозовых распределений;
   - система углового контроля положения глазного яблока (ФТ);
   - система мониторинга характеристик пучка и поглощенной дозы (СМПД);
   - оборудование для формирования дозовых полей;
   - система светового позиционирования пациента;

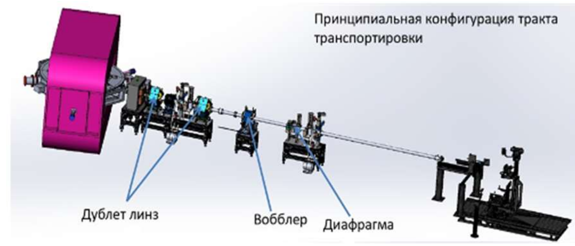
- система верификации индивидуальных средств формирования пучка (коллиматор, болюс)
- АСУ оптической скамьи.



3. Программно-аппаратный комплекс, включающий специализированное программное обеспечение (ПО) и приобретение необходимого оборудования (ПАК):
   - система автоматизированного управления процессами контроля качества с аппаратным обеспечением;
   - система рентгеновской навигации;
   - система управления технологическими процессами (АСУ ТП);
   - система дозиметрического планирования протонной лучевой терапии глаза и его придаточного аппарата (СДАП);
   - система хранения и обработки дозиметрических данных (СХОДД);
   - радиологическая информационная система (РИС).



4. Система терапевтического пучка малой интенсивности:
   - подсистема вывода пучка малой интенсивности;
   - подсистема транспортировки пучка малой интенсивности.

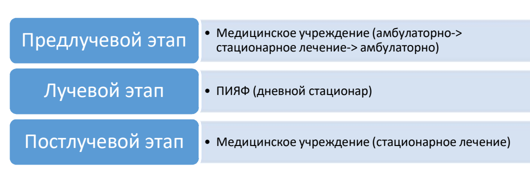


ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ОКО»

Технические характеристики комплекса	
Параметр	**Значение**
Энергия протонов, МэВ	70
Интенсивность пучка, мкА	1,0–1,5
Диаметр поперечного сечения пучка на входе в процедурное помещение, мм	60
Расходимость пучка, мрад	не более 3
Неравномерность плотности частиц по сечению пучка, %	не более ±3

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ

С точки зрения организации медицинского сопровождения технологический процесс протонно-лучевой терапии пациентов с онкоофтальмологическими новообразованиями включает в себя следующие этапы:



1. Предлучевой этап

1.1. Регистрация и получение первичных клинических топометрических данных пациента.

- регистрация и первичное обследование пациента (амбулаторно);
- онкологический консилиум;
- МРТ без скрепок;
- предварительное МРТ планирование;

- назначение времени на проведение этапа «Предлучевой топометрии на лучевой установке»;
- подшивка танталовых скрепок на глаз.

1.2. Предлучевая топометрия на лучевой установке.

Пациент проходит в помещение процедурной лучевой установки (ЛУ). На основном пульте управления (ОПУ) активируется режим «Имитация» (действия с УППП происходит с ручного пульта управления (РПУ). Положение УППП - «размещение пациента». Пациент размещается в УППП медицинским персоналом центра протонно-лучевой терапии (ПЛТ) ПИЯФ, выполняется иммобилизация головы пациента посредством изготовляемых индивидуальных фиксирующих приспособлений (маска, индивидуальная капа). Изготовленные средства иммобилизации маркируются, информация о них заносится в историю болезни пациента. Выполняются следующие действия:

- Перевод УППП и фиксационной точки (ФТ) лучевой установки с помощью РПУ в автоматическом режиме в «Начальное» положение (безопасное положение, с точки зрения столкновения с оборудованием комплекса, пациента на оси пучка) под визуальным контролем оператора.
- Перевод УППП с помощью РПУ в положение «Старт» в ручном режиме, когда край внешней поверхности роговицы обоих глаз располагаются так, как представлено ниже.

- С АРМ выполняется пара синхронных рентгеновских снимков при положении «Старт» (пациент не смотрит на ФТ, оператор наблюдает за взором с помощью видео навигации). ОПУ содержит кнопку для проведения снимка рентгеновской навигации (РН), при нажатии которой выполняется РН. Нажатие приводит к тому, что АСУ ТП выдает сигнал системе рентгеновской навигации, которая при выполнении снимков выдает синхронный сигнал ФТ.
- ФТ переведено в положение «Начальное», заданное предварительным планом с помощью АРМ ОКО.
- Пациент переводит взор на ФТ, относительно положения «Старт» (оператор наблюдает за взором с помощью ПО ФТ и видео навигации.
- Выполняется пара синхронных рентгеновских снимков в положении взора на ФТ. Совместно с рентгеновской навигацией (РН), формируется стоп-кадр с ФТ.
- Медицинский физик на АРМ ОКО выполняет совмещение МРТ данных и рентгеновских изображений, полученных на этапе предлучевой топометрии на ЛУ. Встроенными инструментами ПО АРМ ОКО путём совмещения изображений выполняется проверка координат скрепок по отношению к предварительному планированию. Если координаты скрепок отличны от данных в истории болезни, то проводится коррекция предварительного плана и координат положения ФТ.
- АРМ ОКО рассчитывает координату точки, относительно которой глаз осуществляет поворот при переводе взора на ФТ по результатам совмещения пары снимков в положении «Старт» и при переводе на ФТ. Рассчитанная точка называется «Синхронизированной точкой вращения» - СТВ, после определения ее координат, в СДАП заносятся координаты этой точки в геометрии глаза и позиция ФТ (координаты). Дальнейшее планирование происходит с учетом этой информации, так как становится известным как перемещать и вращать пациента (мишень) без изменения направления взора.
- Уточненные данные передаются в систему дозно-анатомического планирования (СДАП), где рассчитывается расстояние от внешней поверхности роговицы в проекции центральной части зрачка до центров всех четырёх скрепок, а также информация о координатах точки, относительно которой вращается глаз при переводе взора на ФТ.
- Перемещение мишени осуществляется относительно СТВ согласовано с ФТ, однако на мониторах в процедурной оператор видит

абсолютные значения координат, а не относительные в системе, центром которой является СТВ. Координаты смещения также считаются в абсолютных значениях координат.

- На подголовную часть УППП устанавливается механическая фиксационная точка (МФТ ЛУ). Выполняется установка МФТ ЛУ в соответствии с координатами ФТ – медперсонал перемещая бегунок с отверстием на штативе МФТ ЛУ, располагает его таким образом, чтобы пациент через отверстие в бегунке на штативе МФТ ЛУ видел свет от ФТ и по изображению на мониторе ПО ФТ медицинским персоналом осуществляется визуальный контроль совпадения ФТ и МФТ ЛУ.
- По окончании этапа «Предлучевой топометрии на ЛУ» рентгеновские снимки и координаты положения шарниров МФТ ЛУ сохраняются в системе РИС. Индивидуальные средства иммобилизации направляются в медицинском учреждении вместе с сопровождающим персоналом. В СДАП вносятся координаты СТВ и параметры МФТ ЛУ.

1.3. КТ-топометрия в медицинском учреждении

Постулат: расчёт финального плана осуществляется на основе полученных с КТ серии снимков с положением глаза, связанным с костными структурами) тем же способом, что и при дальнейшем лечении.

1.4. Планирование облучения

- Планирование облучения на основе данных модели глаза (опционально для сравнения планов) при необходимости медицинский физик выполняет дополнительное планирование в СДАП по алгоритму модели глаза, сформированной по первичным топометрическим данным. Этап «Планирование облучения» выполняется в медицинском учреждении на ПК с СДАП.
- Итоговые данные планирования загружаются в РИС.
- Утверждение плана: врач-радиотерапевт загружает данные планирования облучения из РИС в системе СХОДД (АРМ врача, web приложение), которая может быть размещена, например, на том же ПК, который работает с РИС) выполняет проверку плана облучения и утверждает его. После подписи врачом план имеет статус «План подтверждён», что означает, что врач согласен лечить данного пациента при таком изодозном распределении, если оно будет доставлено корректно.

1.5. Техническая подготовка плана (ПИЯФ)

- Изготовление индивидуальных средств формирования дозового распределения: Оператор ЧПУ изготавливает индивидуальный коллиматор. На 3D принтере изготавливается компенсатор. На термопринтере печатается индивидуальный код, получаемый из РИС, и наносится на изготовленные изделия.
- Верификация плана облучения и постановка на лечение: утвержденный врачом-радиотерапевтом план в СДАП пересчитывается на известные структуры фантомов (водный, твердотельный, матрица). План отправляется на АРМ ОКО в формате DICOM RT. В режиме «Гарантия качества» на оптической скамье устанавливаются индивидуальные средства формирования дозового распределения. Медицинским физиком выполняется верификация этого проверочного плана на ЛУ. Если план не прошел верификацию, то выясняется причина и при необходимости план пересчитывается.
- Подготовка плана: после успешной верификации плана, план можно готовить к процедуре облучения пациента. Помимо параметров установки для ЛУ в DICOM RT, он содержит контуры структур, включая оконтуренные скрепки и/или реконструированную рентгенограмму (DRR, 3D изображение, собранное в 2D).
- Назначается дата и время лечения. Назначается порядок подведения планов, если их несколько. Для плана устанавливается определенный тип визуализации и шаблон, по которому нужно проводить визуализацию.
- Верифицированному и подготовленному плану пациента, поставленного в расписание, присваивается статус «К лечению готов». План становится доступен к исполнению на АРМ ОКО в формате DICOM RT.

2. Лучевой этап

2.1. Идентификация пациента.

2.2. Подготовка элементов УФКП и РН: С АРМ ОКО в режиме «Процедура» устанавливаются параметры положения элементов УФКП в соответствии с планом. Под управлением АРМ ОКО система РН приводится в состояние готовности и передает на АРМ ОКО соответствующий статус. В соответствии с идентификационными данными пациента и плана, открытого на АРМ ОКО, на АРМ РН передаются параметры выполнения рентгеновских снимков (шаблон рентгеновского исследования).

2.3. Перевести циклотрон в режим «Standby». Все системы циклотрона готовы к генерации пучка (запускается с АРМ Ц-80, выполняется в автоматическом режиме). В процессе выхода на режим «Standby» в АРМ ОКО отдается статус «Выход на режим Standby». По окончании выхода на режим «Standby» в АРМ ОКО передается статус «Standby». Начать «Отпуск дозы» из этого режима нельзя, пока не выполнены процедуры «Доставка пучка в процедурную» и «Инициализация пучка».

2.4. «Инициализация пучка»

2.5. Доставка пучка в процедурную

2.6. Верификация позиционирования пациента: в процедурной при помощи оператора, в присутствии врача, пациент размещается в кресле УППП в положении «Размещения пациента», иммобилизируется средствами фиксации и под визуальным контролем оператора при помощи РПУ размещается в положение «Лечебное», рассчитанное системой планирования, взор пациента направляется на ФТ (которая также выставляется при удержании на РПУ кнопки «Лечебное»). Если ФТ выходит в положение, соответствующее плану, то после достижения запланированного положения, на АРМ ОКО появляется статус готовности к проведению РН, в противном случае происходит блокировка проведения РН).

2.7. Рентгеновская визуализация: при объективном контроле камерой ФТ производится пара рентгеновских снимков и стоп-кадр с ФТ (синхронно).

2.8. Совмещение изображений.

2.9. Контроль глаза при помощи ФТ.

2.10. Статус контроля положения глаза является опорным в технологии.

Постулат: принятие решения о корректности положения взора пациента и о возможности начала лечения, является РН. Референсное положение глаза на стоп-кадре ФТ «привязано» к системе РН, что обеспечивает косвенный контроль положения ренгеноконтрастных скрепок, как следствие, мишени.

2.11. Отпуск предписанной дозы.

2.12. Фиксация факта лечения: информация об отпущенной дозе и координатах смещения пациента, произведенном во время подготовки, передается в РИС.

2.13. Повторные сеансы лечения

3. Постлучевой этап

Контроль успешного проведения лучевого лечения проводится врачом-онкологом медицинского учреждения, ведущим пациента, с целью отслеживания межфракционных изменений опухоли, и выявления осложнений после окончания проведения ПЛТ. Долгосрочное наблюдение за пациентом осуществляется согласно утвержденным Министерством здравоохранения клиническим рекомендациям.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРНОЙ ЛАМПЫ В АНОДНОМ ИМПУЛЬСНОМ МОДУЛЯТОРЕ

В.Н.Зубец, А.И.Кваша, А.В.Фещенко, Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Аннотация

Работы по модернизации каналов усиления системы ВЧ питания начальной части ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН ведутся непрерывно на протяжении уже многих лет. В последние годы основные усилия были направлены на модернизацию мощных импульсных высоковольтных модуляторов в связи с вынужденной необходимостью применения в них генераторных ламп ГИ-71А в качестве модуляторных вместо снятых с производства модуляторных ламп ГМИ-44А. Основной проблемой являются пробои в модуляторной лампе, в основном инициируемые искрениями в аналогичной лампе ВЧ генератора, на которую работает модулятор. В работе проводится анализ процессов, происходящих при возникновении пробоев как в случае прерывании импульса запуска модулятора с целью прекращения пробоя, так и без такого прерывания. Описаны доработки как схемного, так и конструктивного характера, которые в комплексе позволили существенно снизить частоту и последствия возникновения пробоев в модуляторной лампе несмотря на неизбежные искрения в лампе генераторной, обеспечив тем самым приемлемый уровень надежности работы системы ВЧ питания.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по модернизации системы ВЧ питания начальной части линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН непрерывно продолжаются уже более 25 лет. В основном это связано с изменением номенклатуры ламп, выпускаемых АО "С.Е.Д.-СПб" и применяемых в системе ВЧ питания. Так сначала был прекращён выпуск генераторного триода ГИ-54А, используемого в выходных ВЧ каскадах каналов усиления, затем тетрода ГИ-51А (предвыходной ВЧ каскад) и, наконец, модуляторного триода ГМИ-44А. Вместо первых двух ламп после существенной модернизации ВЧ каскадов используются лампы ГИ-71А [1] и ГИ-57А [2].

Что касается модуляторных ламп ГМИ-44А то в АО "С.Е.Д.-СПб" были предприняты две попытки их реставрации, закончившиеся, однако, безрезультатно. В сложившейся ситуации единственным решением оказалось использование в качестве модуляторной лампы генераторного триода ГИ-71А [3]. В основе такого решения лежит то, что лампа ГИ-71А по своим мощностным, токовым и высоковольтным параметрам примерно соответствует лампе ГМИ-44А. Существенными факторами являются возможность использования тех же высоковольтных трансформаторов накала и выпрямителя смещения, которые были разработаны для лампы ГМИ-44А, незначительный объём доработок в схемах транзисторного и лампового подмодуляторов, отсутствие магниторазрядного насоса. Использование новой лампы привело к освобождению внутришкафного пространства модулятора за счёт меньшего количества накальных шин и громоздкого коаксиального постоянного магнита, в который устанавливалась лампа ГМИ-44А, в результате чего появилась возможность оптимизировать размещение в шкафу накальных кабелей, шлангов охлаждения и соединительных высоковольтных кабелей тем самым снизив вероятность пробоев. Также появилась возможность упрощения схемы модулятора за счёт отключения корректирующей обратной связи, охватывающей транзисторный и ламповый подмодуляторы, без которой стабилизация амплитуды ускоряющего поля в ускоряющем резонаторе при работе модулятора с лампой ГМИ-44А была невозможна [4]. Кроме того, снижение номенклатуры ламп и фактическое удвоение их выпуска позволяет надеяться на повышение их качества. Немаловажным фактором является возможность работы лампы в модуляторе при пониженном накале, поскольку ток эмиссии лампы ГИ-71А почти в два раза превышает ток эмиссии ГМИ-44А, что увеличивает срок службы лампы ГИ-71А в качестве модуляторной.

Помимо указанных положительных факторов возникает и ряд проблем обусловленных спецификой использования генераторного триода в качестве модуляторной лампы. Так до 1,5÷2 кВ снижается допустимая величина напряжения сетка-катод, а сеточный ток, требуемый для открытия лампы, увеличивается до 20÷30 А. Увеличивается напряжение на открытой лампе с 1÷2 кВ до 5÷10 кВ в зависимости от выходной мощности канала усиления, что приводит к необходимости повышения напряжения питания анода. Возникает также необходимость увеличения усиления в цепи обратной связи системы стабилизации амплитуды и, в частности, транзисторного подмодулятора, из-за меньшего усиления модуляторной лампы ГИ-71АМ по сравнению с ГМИ-44А. Кроме того, система прерывания импульса запуска (ПРИЗ), используемая для защиты ламп при пробоях и надежно работающая с лампой ГМИ-44А [5], оказывается неэффективной.

При дальнейшем изложении генераторный триод ГИ-71А, используемый в качестве модуляторной лампы, будет обозначаться как ГИ-71АМ.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПРОБОЕВ

Упрощённая схема ВЧ канала усиления начальной части ускорителя показана на рис. 1. ВЧ сигнал генерируется мощным задающим устройством МЗУ и усиливается четырехкаскадным усилителем К1÷К4. Питание двух первых каскадов осуществляется от отдельного модулятора МВ. Питание оконечного и предоконечного каскадов осуществляется модулятором на лампе ГИ-71АМ. В состав этого модулятора входит подмодулятор на лампе ГМИ-34А с накопителем энергии С3 и транзисторным подмодулятором ТП. Импульс управления на лампу ГИ-71АМ подается через высоковольтный импульсный трансформатор ИТ. Система ПРИЗ служит для прерывания импульса запуска модулятора по сигналу с трансформатора тока ТТ при превышении током анода заданного уровня. Управляющий импульс регулируется с помощью системы стабилизации амплитуды и фазы ВЧ поля в резонаторе АРФА. В качестве накопителя энергии используется искусственная формирующая линия ИФЛ с волновым сопротивлением 25 Ом и электрической длиной 200 мкс, запитанная от силовой сети 10 кВ через вакуумный выключатель ВНВ, индукционный регулятор ИР и ВВ выпрямитель КВТМ.

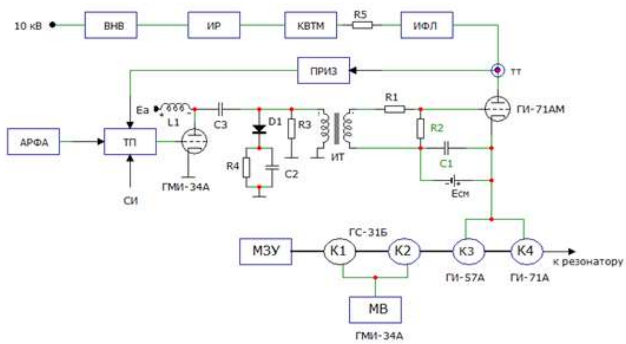


Рисунок 1: Упрощённая схема ВЧ канала усиления начальной части ускорителя.

Основной проблемой при работе с лампой ГИ-71АМ являются пробои как в самой модуляторной лампе, так и в аналогичной лампе ВЧ генератора, на которую работает модулятор. На Рис. 2 показан пример типичной осциллограммы анодного тока модуляторной лампы и напряжения на первичной обмотке ИТ в случае искрения в генераторной лампе. При нормальной работе ток анода составляет около 150 А. Примерно через 200 мкс после начала импульса наблюдается скачок анодного тока примерно до 500 А, что приводит к срабатыванию системы ПРИЗ, запиранию лампы ГМИ-34А (рис. 1) и прерыванию импульса запуска, поступающего на сетку лампы ГИ-71АМ. Однако лампа ГИ-71АМ остается открытой. Отметим, что ток анода 500 А не выходит за пределы допустимого номинального тока, составляющего 900 А, то есть по аноду лампа работает практически в номинальном режиме, а скачок тока обусловлен изменением нагрузки, на которую работает модулятор (лампы ГИ-57А и ГИ-71А каскадов К3 и К4). В качестве причины изменения нагрузки мы предполагаем искрение в генераторной лампе ГИ-71А, что является типичным для такого типа ламп, особенно в процессе их тренировки.

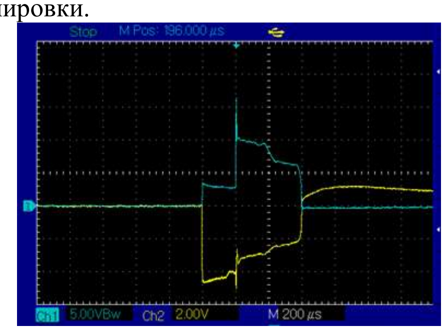


Рисунок 2: Типичные осциллограммы анодного тока модуляторной лампы (верхний луч, 50 А/В) и напряжения на первичной обмотке ИТ (нижний луч, 5 кВ/В) при пробое с включенной системой ПРИЗ.

Обычно длительность ВЧ импульсов составляет немного менее 400 мкс, что достаточно для ускорения импульсов тока пучка до 200 мкс. Уровень анодного тока 500 А сохраняется приблизительно постоянным до 400-ой микросекунды от начала импульса, до того момента, когда волна в линии, возникшая в начале импульса, отразившись от выхода достигает входа. В этот момент происходит уменьшение напряжения на аноде и снижение тока анода до уровня примерно 350 А, который остается приблизительно постоянным до того момента времени, когда волна, образовавшаяся при возникновении пробоя, отразившись от выхода линии достигает входа. В этот момент напряжение на аноде падает и становится уже недостаточным для поддержания разряда в лампе ГИ-71А и модуляторная лампа ГИ-71АМ закрывается. Отметим, что возникновение пробоя в районе 200-ой микросекунды от начала импульса, что соответствует электрической длине ИФЛ, является частным случаем, пробои происходят и в иные моменты времени.

После возникновения пробоя и срабатывания ПРИЗ напряжение на первичной обмотке ИТ не пропадает, несмотря на запирание лампы подмодулятора ГМИ-34А, а остается отрицательным. Причиной последнего может быть продолжение импульса положительной полярности на вторичной обмотке ИТ, что может происходить при эмиссии электронов с сетки лампы из-за ее перегрева потоком электронов с катода. Действительно, особенностью лампы ГИ-71АМ является большой сеточный ток, на полтора порядка превышающий сеточный ток лампы ГМИ-44А, под которую изначально разрабатывался модулятор, включая ИТ. Именно прерывание такого тока системой ПРИЗ и приводит к появлению перенапряжений на сетке модуляторной лампы из-за большой энергии в индуктивности вторичной обмотки ИТ, Это, в свою очередь, приводит как к возрастанию потока электронов с катода на сетку, так и к увеличению их энергии. В результате увеличивается поверхностный нагрев сетки и появление термоэмиссии. При этом происходит быстрый разряд емкости C1 в цепи смещения (Рис. 1), а источник смещения $E_{см}$ перегружается, что в ряде случаев приводит к отключению модулятора по цепям защиты.

В описанной ситуации работа системы ПРИЗ оказывается неэффективной, поэтому были предприняты попытки работы с отключением данной системы. Типичной пример осциллограммы анодного тока модуляторной лампы и напряжения на первичной обмотке ИТ для данного режима при пробое показан на Рис. 3.

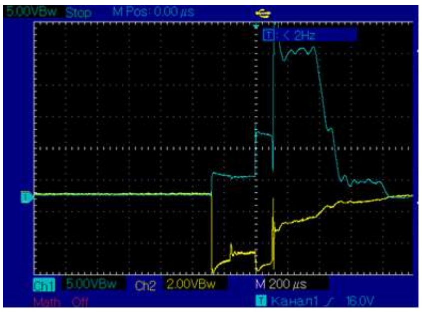


Рисунок 3: Типичные осциллограммы анодного тока модуляторной лампы (верхний луч, 50 А/В) и напряжения на первичной обмотке ИТ (нижний луч, 5 кВ/В) при пробоях с отключенной системой ПРИЗ.

Отметим, что изменение обоих сигналов примерно на 120-ой микросекунде от начала импульса происходит из-за работы системы стабилизации ВЧ поля в резонаторе (АРФА) при достижении уровнем поля заданного значения. Искрение в генераторной лампе начинается примерно на 280-ой микросекунде. В этот момент начинается снижение уровня ВЧ поля в резонаторе и система АРФА увеличивает управляющий сигнал на первичной обмотке ИТ с целью компенсации этого снижения. В отличие от предыдущего случая сеточный ток модуляторной лампы не прерывается и, как следствие, отсутствуют перенапряжения, приводящие к росту эмиссии электронов из сетки модуляторной лампы.

Около 400-й микросекунды от начала импульса (в момент окончания импульса возбуждения), наблюдается второй скачок анодного тока до уровня примерно 1000 А. Мы полагаем, что при этом происходит пробой промежутка сетка-катод в модуляторной лампе. Причиной этого является скачок напряжения на сетке, возникающий в момент окончания импульса, из-за энергии, накопленной во вторичной обмотке ИТ. Этому способствует и работа системы АРФА, а также то, что конденсатор смещения C1 в течение всей длительности импульса (400 мкс) дозаряжается сеточным током модуляторной лампы. Пробой промежутка сетка-катод модуляторной лампы на 400-й мкс, поддерживаемый в дальнейшем разрядом конденсатора смещения, инициирует пробой промежутка анод-сетка модуляторной лампы и последующий переход искрения в дуговой разряд лампы генераторной. При пробое обеих ламп их сопротивление падает настолько, что ток через них фактически определяется напряжением на линии к моменту пробоя и ее волновым сопротивлением, а длительность импульса тока, примерно 400 мкс, соответствует удвоенной электрической длине линии.

ДОРАБОТКИ АНОДНОГО МОДУЛЯТОРА

С учетом вышеописанных механизмов возникновения и развития пробоев были испробованы несколько способов их предотвращения или минимизации последствий. Приемлемый результат был достигнут после установки конденсатора емкостью 5÷10 нФ между сеткой и катодом модуляторной лампы и отключения диодной сборки D1 (Рис. 1), служащей для поглощения энергии, накопленной в первичной обмотке ИТ, после обрыва запускающего импульса модулятора. Конденсатор забирает часть энергии, накопленной в индуктивности вторичной обмотки ИТ к моменту окончания импульса модулятора, уменьшая тем самым перенапряжения на сетке. Безусловно, добавление инерционного звена в контур системы авторегулирования, стабилизирующей ускоряющее поле, отрицательно влияет на устойчивость и качество работы системы. Однако, как показал опыт работы, устойчивость и качество системы стабилизации поля в ускоряющем резонаторе не ухудшаются вплоть до ёмкости 20 нФ. Исключение из схемы диодной сборки приводит к формированию положительного выброса на первичной обмотке ИТ, который, трансформируясь во вторичную обмотку, дает отрицательный импульс, компенсирующий положительный выброс, обусловленный энергией во вторичной обмотке. При этом каких бы то ни было дополнительных нежелательных эффектов не наблюдается. На Рис. 4 приведен пример осциллограммы анодного тока модуляторной лампы и напряжения на первичной обмотке ИТ при искрениях в генераторной лампе с отключенной системой ПРИЗ после внесения указанных изменений.

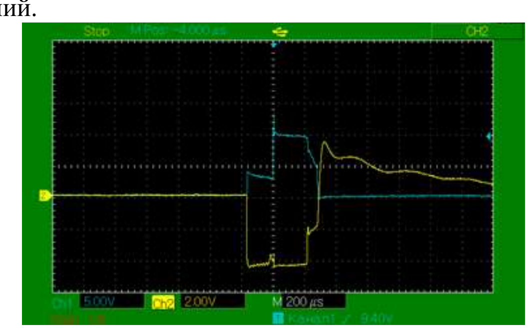


Рисунок 4: Типичные осциллограммы анодного тока модуляторной лампы (верхний луч, 50 А/В) и напряжения на первичной обмотке ИТ (нижний луч, 5 кВ/В) при искрениях в генераторной лампе с отключенной системой ПРИЗ после внесения изменений.

Видно, что сильноточный разряд не развивается, а слаботочный разряд (искрение) в генераторной лампе заканчивается с окончанием импульса модулятора. Также можно наблюдать положительный выброс напряжения на первичной обмотке ИТ, возникающий при снятии импульса возбуждения, который уменьшает перенапряжения между сеткой и катодом модуляторной лампы. В таком режиме не происходит перегрузки в цепи источника питания смещения сетки, приводящей к отключению модулятора.

При отключённой системе ПРИЗ импульсы высокого напряжения, подаваемые на генераторную лампу, при возникновении в ней искрений не прерываются, а имеют номинальную длительность, что позволяет ускорить тренировку новых ламп и достижение рабочего режима. По этой причине в настоящее время в качестве основного режима работы используется режим с отключенной системой ПРИЗ.

Помимо указанных доработок выполнен ряд и иных доработок модуляторов, позволивших улучшить надежность работы ВЧ каналов. Так в наиболее мощных каналах усиления № 2,3,4 и резервном канале № 6 в цепи заряда ИФЛ установлены резисторные сборки R5 (Рис. 1) с сопротивлением 500 Ом, рассчитанные на мощность тепловыделений около 5 кВт (Рис. 5). Эти сборки ограничивает токи заряда ИФЛ при пробоях в модуляторе и ВЧ каскадах, снижая тем самым опасность выхода из строя индукционных регуляторов ИР (Рис. 1).

Рисунок 5: Резисторная сборка в цепи заряда ИФЛ.

Рисунок 6: Новый ВВ трансформатор накала для лампы ГИ-71АМ (слева) и лампа ГИ-71АМ с вакионом в катоде (справа).

Разработаны, изготовлены и установлены новые высоковольтные трансформаторы накала модуляторных ламп (Рис. 6) с уменьшенным рабочим током, поскольку номинальный ток накала в лампе ГИ-57А в два раза ниже, чем в лампе ГМИ-44А. По нашему заданию в АО «С.Е.Д.-СПб» изготовлено несколько ламп ГИ-71АМ с вакионом в катоде (Рис. 6), что позволяет надеяться на улучшение электропрочности благодаря дополнительной откачке. К настоящему времени, однако, полноценные испытания таких ламп не завершены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени очередной этап модернизации системы ВЧ питания начальной части ускорителя, которая практически не прерывалась с момента её запуска, близок к завершению. Осталось доработать ВЧ каскады К3 под лампу ГИ-57А в каналах усиления № 5 и RFQ, где сейчас ещё установлены лампы ГИ-51А, и перевести модулятор в канале RFQ на лампу ГИ-71АМ, после чего архитектура каналов станет однотипной.

Кроме того, упрощается эксплуатация системы ВЧ питания в целом, поскольку не понадобится индивидуальный подход к ремонту и настройке каждого канала. К тому же создан на много лет вперёд необходимый запас ламп ГИ-57А и налажены надёжные поставки ламп ГИ-71А предприятием АО «С.Е.Д.-СПб», потребности в которых удвоились после их установки не только в выходных ВЧ каскадах, но и в мощных анодных модуляторах. Последнее обстоятельство, несомненно, положительно скажется и на качестве ламп ГИ-71А, поскольку единственным их потребителем до сих пор является ИЯИ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A.I.Kvasha *et al.*, "A new 200MHz Powerful Pulse Triode for the Output Power Amplifier of DTL RF System", in *Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conf. (PAC2001),* Chicago, USA, June 2001, pp.1222-1224.

[2] А.И.Кваша, *"*Численное моделирование режима работы мощного усилительного ВЧ каскада*",* Вопросы атомной науки и техники, №3 (79), серия "Ядерно-физические исследования" (58), 2012, с.29-33.

[3] A.I.Kvasha, V.L.Serov. "Powerful RF triode as anode modulator vacuum tube", in *Proc. of XXV Russian Particle Accelerator Conf (RUPAC2016)*, St. Petersburg, Russia, Nov. 2016, pp.294-296.

[4] A.I.Kvasha. *"*Improving of the DTL cavity RF voltage stability by means of anode modulator feedback", in *Proc. of XXII Russian Particle Accelerator Conf (RUPAC2010)*, Protvino, Russia, Sept. 2010, pp.366-368.

[5] A.I.Kvasha, Yu.M.Lopatnikov "Results of the INR DTL series crowbar system testing", Вопросы атомной науки и техники, №3 (67), серия "Ядерно-физические исследования" (54), 2010, с.13-17.

АППАРАТУРА ЗАДАЮЩЕГО ВЧ-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ КОМПЛЕКСА НИКА

А.С. Стюф[12], Г.А. Фатькин[12], А.И. Сенченко[1], В.Е Ситнов[12], К. Р. Яминов[1]
[1]ООО «Козилаб Сибирь», г. Новосибирск
[2]Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск

Аннотация

Аппаратура задающего ВЧ-генератора предназначена для построения синхронной системы генерации опорного ВЧ сигнала для трех независимых ВЧ-систем комплекса НИКА: Бустера, Нуклотрона и Коллайдера, а также для ВЧ-синхронных систем диагностики. В основе работы ВЧ-генератора лежит метод прямого цифрового синтеза (DDS), реализованного при помощи ПЛИС и ЦАП. Аппаратура задающего ВЧ обеспечивает генерацию 4-х независимых опорных сигналов в диапазоне 0,1÷35 МГц, обработку сигналов с датчиков магнитного поля (аналогового и В-серии) с точностью не хуже 10^{-5}, генерацию и прием цифровых сигналов с временным разрешением 10 нс. Система генерации ВЧ, построенная на представленных генераторах, позволяет раздавать синхронный опорный ВЧ-сигнал на расстояние до 1 км. В докладе представлены параметры изготовленных образцов ВЧ-генератора, а также результаты работы на осенне-зимнем сеансе Бустер-Нуклотрон 2022 г.

ВВЕДЕНИЕ

В Объедененном Институте Ядерных Исследований (г.Дубна) строится ускорительный Комплекс НИКА (NICA, Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1], в состав которого входят три циклических ускорителя: Бустер, Нуклотрон, и Коллайдер НИКА. Для обеспечения слаженной работы комплекса был разработан проект синхронизации и задающего ВЧ [2].

В качестве основы для построения системы синхронизации была выбрана аппаратура MRF (Micro Research Finland) [3]. На базе данных устройств построена иерархичная оптическая сеть, в котрой передается тактовая частота (100 МГц), события, а также некоторый объем данных. Кроме этого, данная система позволяет динамически компенсировать задержки от прохождения сигнала по оптическим кабелям. Используя особенности данной оптической сети, можно получить на большом удалении (несколько километров) устройства, способные генерировать синхронно тактовый сигнал одной частоты, а также генерировать на основе передаваемых событий электрические импульсы с различной длительностью, что позволяет решить основные задачи по синхронизации комплекса.

Используя эту оптическую сеть, можно реализовать цифровую генерацию опорного ВЧ: LLRF (Low Level RF).

На основе анализа проекта Комплекса НИКА, а также учитывая опыт работы на Нуклотроне и Бустере были сформулированы требования к физическим параметрам аппаратуры LLRF приведенные в Таблице 1.

Таблица 1: Основные параметры работы LLRF

Параметр, ед. изм.	**Значение**
Рабочая частота, МГц	0,1…39
Разрешение по частоте, Гц	0,035
Скорость перестройки частот, МГц/с	10
SFDR, dB	не менее 60
Межмодульный джиттер ВЧ-сигнала, пс	не более 200
Амплитуда выходного сигнала, В @ 50Ом	не менее ±1 В
Ср. кв. шум измерителя магнитного поля, uT	не более 20 мкТ
Ошибка измерения за 1с, мкТ	не более 20 мкТ

КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

Общее описание

При разработке генератора задающего ВЧ было решено исполнить аппаратуру в формате стандартного модуль PCI-E, высотой 2U. Это позволило использовать относительно недорогие промышленные компьютеры в качестве носителя плат.

Аппаратура LLRF исполнена в формате двух отдельных модулей: LLRF-HP и LLRF-AFE соединенных между собой двумя шлейфами.

Фотографии готовых модулей, установленных в промышленный ПК приведены на рисунке 1.

Рис. 1. Аппаратура LLRF, установленная в слот PCI-E

LLRF-HP – аппаратная платформа

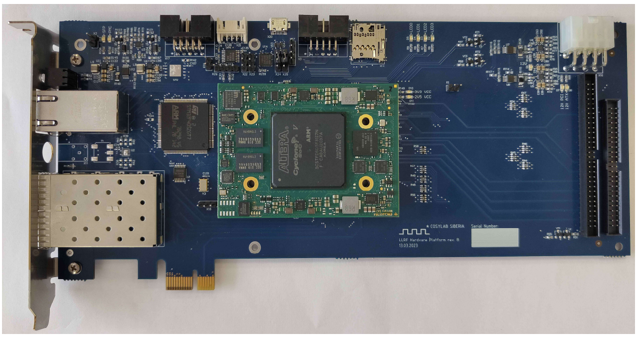


Рис. 2. LLRF-HP

LLRF-HP (Рис. 2) — это универсальная аппаратная платформа на базе ПЛИС Cyclone V, которая предоставляет следующие возможности:

- Интерфейс PCI Express для управления устройством со стороны управляющего ПО комплекса [4]
- Синхронизация по оптической сети, согласно протоколу MRF с выравниванием задержки и приема и передачи данных
- Поддержка общей «временной сетки» работы ВЧ-генераторов

Упрощенная функциональная схема LLRF-HP показана на Рис. 3.

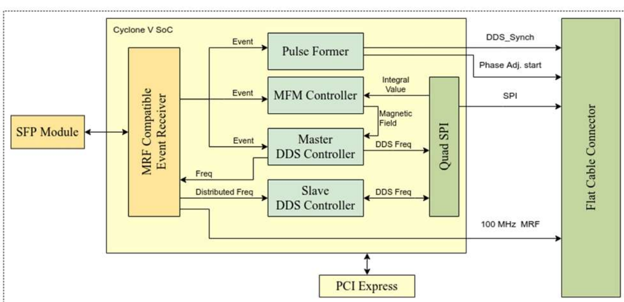


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема LLRF-HP

Event Receiver, который поддерживает MRF-совместимый протокол обеспечивает приём событий, обмен данными и выравнивание задержек между модулями. При помощи механизма Clock and Data Recovery восстанавливается несущая частота принимаемого битового потока, обеспечивая одинаковую «временную сетку» для пространственно разнесенных устройств.

В LLRF-HP имеется четыре контроллера прямого цифрового синтеза (DDS), которые управляют соответствующими выходами в LLRF-AFE. Каждый контроллер может работать как в режиме ведущего, который меняет частоту по заданному сценарию, так и в режиме ведомого, который получает значение частоты от ведущего. Контроллер MFM получает значение интеграла от LLRF-AFE и пересчитывает его в магнитное поле, которое далее может быть пересчитано в соответствующее значение частоты в контроллере DDS.

Сценарии работы контроллеров задаются при помощи дескрипторов, представляющих собой таблицы, расположенные в памяти устройства и описывающие операцию, которая должна быть исполнена, а также параметры данной операции (Рис. 4). Примером таких операций для контроллеров DDS являются: задание режима постоянной частоты, задание режима слежения частоты за полем, плавная перестройка частоты за указанное время, подстройка фазы. Для контроллера MFM — это старт и остановка интегратора, сброс интегратора и загрузка начального значения магнитного поля.

Запуск исполнения дескриптора может осуществляться по событию от Event Receiver-а, которое распространяется по оптической сети, либо дескриптор может запускаться после завершения выполнения другого дескриптора. Таким образом можно формировать достаточно сложные циклограммы.

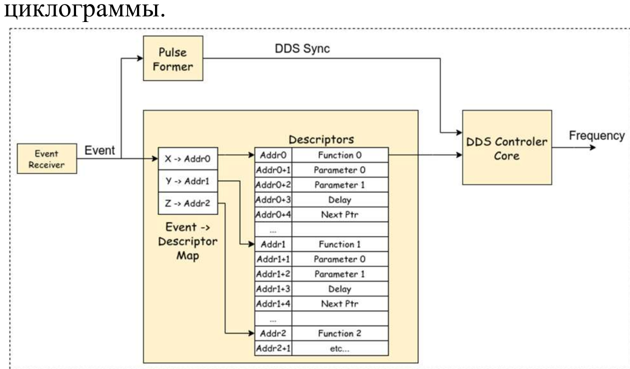


Рис.4. Дескрипторы LLRF-HP

Для создания одинаковой «временной сетки» в устройствах используется импульс DDS Sync (Рис. 5), который следует во всех устройствах синхронно с учетом задержек распространения с конфигурируемой частотой не более 100 КГц. По приходу данного импульса происходят несколько событий: в LLRF-AFE применяется значение частоты, посчитанное на прошлом шаге в LLRF-HP; LLRF-HP (ведущий) считывает измеренное значение магнитного поля, затем высчитывает соответствующую ему частоту и отправляет её в ведомые устройства; LLRF-HP (ведущий и ведомые) записывают новое значение частоты в LLRF-AFE. На следующий такт DDS Sync все повторяется.

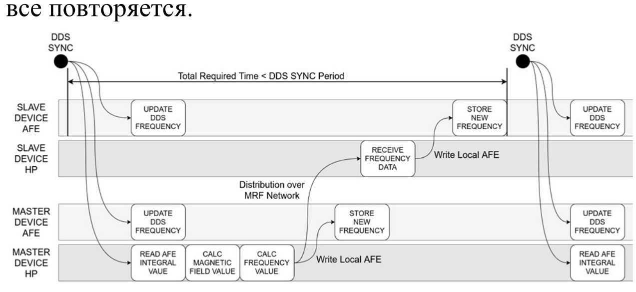


Рис.5. Пример временной диаграммы работы LLRF-HP

LLRF-AFE – модуль аналоговых интерфейсов

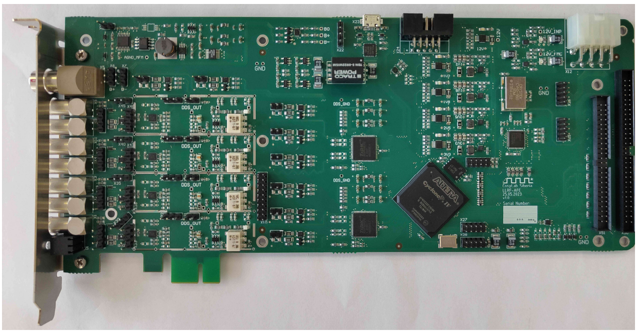


Рис. 6. LLRF-AFE

LLRF-AFE (Рис. 6) представляет собой расширение для аппаратной платформы LLRF-HP, обеспечивающее следующие функции:

- генерацию 4-х независимых каналов опорного ВЧ сигнала;
- измерение сигнала производной магнитного поля;
- поддержку цифровых конфигурируемых входов/выходов;
- аппаратную реализацию алгоритмов:
  - алгоритма прямого цифрового синтеза (DDS)
  - равномерной подстройки фаз каналов DDS
  - интегрирования сигнала магнитного поля для цифрового и аналогового каналов

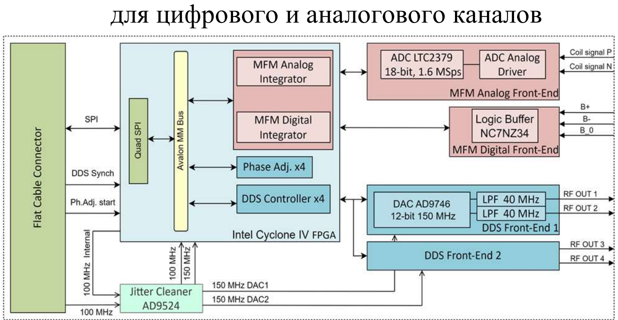


Рис. 7. Функциональная блок схема LLRF-AFE

LLRF-AFE подключается к LLRF-HP с помощью двух плоских шлейфов, использующихся для передачи дифференциального тактового сигнал 100 MHz, дифференциальных синхросигналов DDS Synch и Дифференциальный сигнал запуска алгоритма подстройки фазы Phase Adjust Start, а также цифровой шины Quad SPI.

Шина Quad SPI служит для чтения/записи регистров управления и данных блока LLRF-AFE.

LLRF-AFE содержит:

- 4 контроллера DDS;
- 1 контроллер измерителя магнитного поля;
- 1 контроллер общих системных параметров.

Каждый контроллер DDS совместно с аналоговой частью реализует генерацию частоты методом прямого цифрового синтеза с расширением в виде модуля установки фазы (Рис.8).

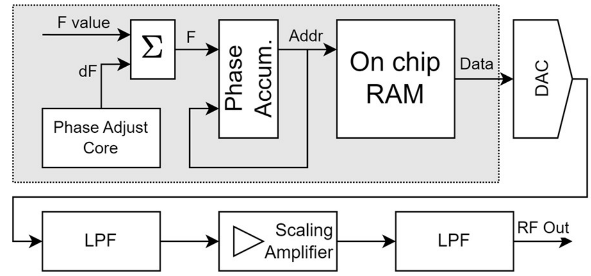


Рис.8. Схема контроллера DDS с аналоговой частью

Для хранения периода гармонического сигнала используется внутренняя память ПЛИС. Подсчет фазы происходит в 32-битном аккумуляторе (Phase Accum.).

Частота работы DDS контроллера (и соответствующего ЦАП) составляет 150 МГц, что, совместно с аналоговым трактом, определяет рабочий диапазон частот:

- Максимальная задаваемая частота: 0,1…39 МГц.
- Шаг по частоте: 150 МГц/2^{32}≈0.349 Гц.

Предусмотрена возможность перезапуска DDS контроллера по синхросигналу с установкой начальной фазы, что позволяет работать нескольким каналам в разных устройствах синхронно, но с фиксированной разностью фаз, в частности это может быть полезно для генерации I и Q сигналов, сдвинутых на 90°.

Для перестройки фазы во время ускорительных циклов используется модуль плавной установки фазы в заданное значение за заданное время (Phase Adjust Core). При запуске происходит подсчет необходимой добавки к фазе, из которой рассчитывается добавка к частоте для DDS контроллера dF(t)Изменение частоты по треугольнику позволяет избежать разрывов второй производной фазы опорного ВЧ сигнала (Рис. 9).

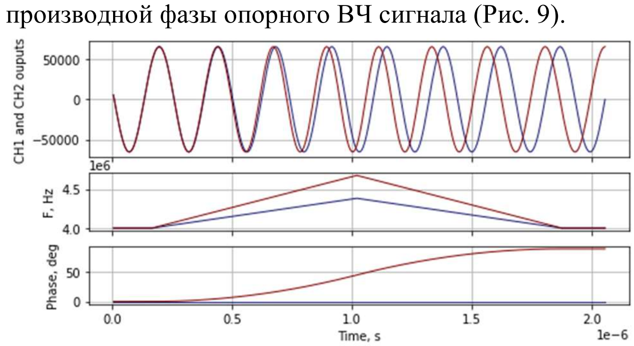


Рис.9. Иллюстрация работы блока установки фазы.

Общая синхронность работы системы позволяет устанавливать фазы на любых модулях LLRF в рамках одной подсети MRF к определенному времени, задаваемому с шагом 10 нс.

Измеритель магнитного поля состоит из аналогового и цифрового измерителя.

Блок-схема аналогового измерителя представлена на рисунке 10.

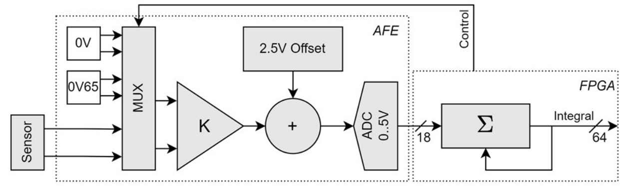


Рис. 10. Блок схема измерителя магнитного поля.

Сигнал с измерительной катушки (Sensor) принимается и усиливается с помощью дифференциального усилителя, затем сдвигается в середину шкалы АЦП и оцифровывается. Цифровой сигнал разрядностью 18 бит передается в ПЛИС, где интегрируется с частотой следования импульсов DDS Synch (10…100 мкс). Итоговый интеграл доступен для чтения по шине SPI.

Цифровой измеритель магнитного поля представляет собой счетчик импульсов, приходящих по двум каналам: B+ и B-, которые формируются преобразователем поле-частота. При получении импульса по каналу B+ происходит увеличение значения интеграла на величину ΔB, при получении сигнала B- - уменьшение на ту же величину.

Предусмотрены различные способы сброса интеграла: электрическим сигналом B0, либо программно, используя соответствующий регистр управления измерителем магнитного поля. Также предусмотрена пауза набора интеграла, что позволяет «заморозить» значение частоты.

Измеренное значение магнитного поля используются для работы LLRF в режиме слежения за магнитным полем.

АПРОБАЦИЯ

Два модуля LLRF были протестированы в ходе осенне-зимнего сеанса 2022 г. С их помощью был ускорен пучок в Бустере и в Нуклотроне. На Рис. 11 приведено значение задаваемой частоты в зависимости от измеренного магнитного поля в Бустере.

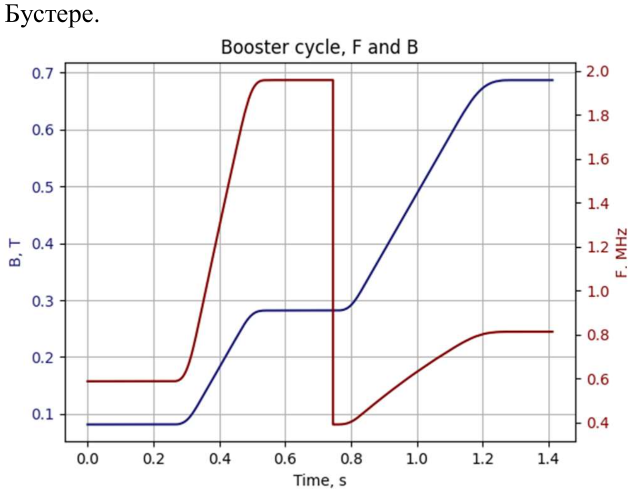


Рис. 11. Изменение частоты в зависимости от поля в Бустере по времени

На графике ярко выражены два этапа работы Бустера:

- 0,5 МГц - 2 МГц: инжекция пучка в Бустер и ускорение на 5-й кратности (левая часть графика);
- 0,4 МГц - 0,8 МГц: ускорение на 1-й кратности (правая часть графика) с последующей экстракцией пучка в Нуклотрон.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были разработаны и испытаны 2 прототипа и 6 комплектов аппаратуры LLRF. 6 устройств поставлено на комплекс НИКА.

Испытания с прототипами на осенне-зимнем сеансе 2022 г. показали возможность ускорения пучка с использованием аппаратуры LLRF, работающей в составе системы синхронизации на базе аппаратуры MRF.

В результате лабораторной отработки ВЧ-генераторов подтверждена возможность синхронной работы устройств с большим пространственным разнесением (~500 м). Продемонстрирована синхронная перестройка фазы к заданному моменту времени в отдельно стоящих устройствах.

В дальнейшем планируется провести сеанс Бустер-Нуклотрон под управлением разработанной задающей ВЧ-системы, и опробовать перепуск между кольцами с и использованием сведения фаз ВЧ-сигналов Бустера и Нуклотрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Технический проект ускорительного комплекса NICA, под общ. редакцией И.Н. Мешкова, Г.В. Трубникова, тт. I-IV, Дубна, 2015

[2] Система синхронизации и задающего ВЧ Комплекса НИКА: проект и первые результаты, Г.А.Фатькин, А.И. Сенченко, и др. // тезисы RUPAC-2023, Новосибирск, Россия

[3] MRF Timing System Status Update, J. Pietrainen // Timing Workshop, ICALEPCS 2017

[4] Инфраструктура и программное обеспечение системы синхронизации и задающего ВЧ для Комплекса НИКА, Г. Фатькин, А. Сенченко, и др.// тезисы RUPAC-2023, Новосибирск, Россия

СТАТУС СИСТЕМЫ ВЧ2 КОЛЛАЙДЕРА NICA

Ю.Бирючевский, А.Драничников, А.Жуков, Е.Кенжебулатов, А.Кондаков, А.Краснов, Я.Крючков, С.Крутихин, Г.Куркин, А.Мартыновский, Н.Митянина[1], С.Мотыгин, А.Мурасев[1], В.Петров, Е.Пята, Е.Ротов[1], В.Тарнецкий[1], А.Трибендис[2], ИЯФ, Новосибирск, Россия
О.Бровко, А.Малышев, И.Мешков[3], Е.Сыресин, ОИЯИ, Дубна, Россия
А.Зинкевич, Триада ТВ, Новосибирск, Россия
[1] также НГУ, Новосибирск, Россия
[2] также НГТУ, Новосибирск, Россия
[3] также СПГУ, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В настоящий момент новосибирским ИЯФ изготовлены, испытаны и отправлены заказчику все восемь резонаторов системы ВЧ2 для коллайдера NICA, строящегося в ОИЯИ (Дубна). Четыре резонатора нижнего кольца коллайдера установлены на свои места в тоннеле. Четыре резонатора верхнего кольца планируется установить осенью 2023 г. Твердотельные радиочастотные усилители мощности, разработанные новосибирской компанией "Триада-ТВ", использующиеся для возбуждения резонаторов ВЧ2, полностью изготовлены, хранятся в ОИЯИ и готовы к монтажу.

ВВЕДЕНИЕ

Установка ионного коллайдера на базе нуклотрона (NICA) [1], работающая в режиме столкновения тяжелых ионов, предназначена для экспериментов со сталкивающимися пучками из ионов 197Au79+ при энергиях от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон на пучок. Каждое кольцо коллайдера имеет одну станцию ВЧ1, четыре станции ВЧ2 и восемь станций ВЧ3 [2].

Барьерная система ВЧ1 используется для улавливания частиц, выбрасываемых из нуклотрона, и накопления необходимого количества ионов. Это делается с помощью техники движущихся барьеров.

Система ВЧ2 работает на 22-й гармонике частоты обращения и может обеспечить постоянное ВЧ напряжение до 0,1 МВ на кольцо. После ее включения и адиабатического увеличения напряжения, в кольцах коллайдера формируются по 22 сгустка. Как только сгустки становятся достаточно короткими (с помощью электронного охлаждения), включается система ВЧ3 и ее напряжение медленно повышается. При этом формируются 66 сепаратрис (в идеале с заполнением только каждой третьей сепаратрисы). Напряжение ВЧ2 поддерживается включенным для усиления группирования. Пучки готовы к эксперименту, когда достигнута длина пучка ≈60 см и разброс импульсов $\approx 10^{-3}$.

ИЯФ им. Будкера вносит свой вклад в несколько частей проекта NICA, включая его радиочастотные системы ВЧ1, ВЧ2 и ВЧ3.

Ниже рассказывается о конструкции и проведенных работах с ускоряющими станциями ВЧ2, каждая из которых состоит из ускоряющего резонатора, системы ВЧ питания и системы управления. Отдельно рассказывается о предпринятых мерах для достижения в ускоряющих резонаторах сверхвысокого вакуума ≈ $3 \cdot 10^{-11}$ торр.

РЕЗОНАТОРЫ

Конструкция

Резонаторы ВЧ2 имеют коаксиальную конструкцию, нагруженную на сильно развитые грибовидные емкости. Для обеспечения широкого диапазона рабочих частот от 11.5 до 13.2 МГц (dF=12%), резонатор оснащен четырьмя радиально расположенными емкостными тюнерами. Концепция резонатора показана на рис. 1.

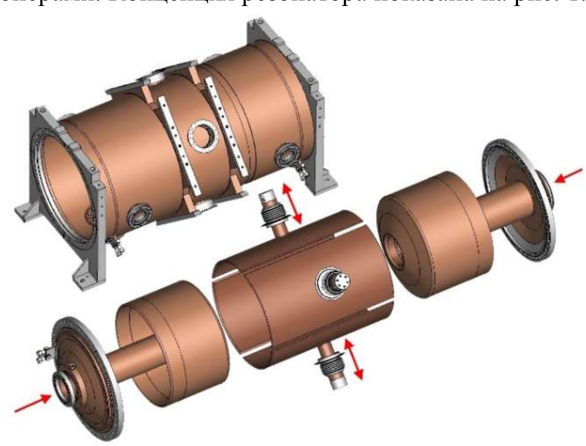


Рисунок 1: Концепция резонатора ВЧ2.

Резонаторы образованы несколькими основными элементами: обечайкой с различными фланцевыми отверстиями, двумя коаксиальными вставками, четырьмя сегментными тюнерами и коротким ускоряющим зазором. Все устройства можно демонтировать со своих разъемов, за исключением сегментных тюнеров, которые устанавливаются в разъемы изнутри и привариваются TIG к фланцам. Детали резонатора изготавливаются либо из меди, либо из нержавеющей стали и соединяются пайкой или сваркой TIG [3].

Выбор минимального зазора

Высокие требования к рабочему уровню вакуума (до $3 \cdot 10^{-11}$ торр) делают заметным влияние ухудшения вакуума из-за автоэмиссионных процессов на поверхностях тюнеров и коаксиальных вставок. При этом на низких рабочих частотах вакуум в резонаторе портится гораздо сильнее из-за более высокой напряженности электрического поля в более узких зазорах тюнеров.

На основании измерений, проведенных с прототипом резонатора ВЧ2, было принято решение увеличить зазоры в серийных резонаторах на 20%. Таким образом ускоряющий зазор резонатора был увеличен с 5 до 6 мм, а минимальные зазоры тюнеров – с 2.5 до 3 мм.

Юстировка и электрическая симметрия

Узкие зазоры резонатора требуют тщательной механической юстировки коаксиальных вставок, тюнеров и приводов тюнеров, которая проводится с помощью специальных оснасток.

Недостаточная точность юстировки нарушает электрическую симметрию тюнеров относительно коаксиальных вставок. Это может привести к существенному ВЧ нагреву сильфонов, соединяющих тюнеры с обечайкой и ухудшению вакуума.

Другое негативное влияние электрической асимметрии - появление момента пандеромоторных сил, которые действуют несоосно оси привода тюнера. Это приводит к снижению порога самовозбуждения системы управления тюнерами.

Холодные измерения резонатора

После установки приводов тюнеров на резонатор, проводится настройка диапазона перестраиваемой частоты и выравнивание индивидуальных перестроек частоты каждым тюнером по-отдельности.

Связь ввода мощности с резонатором настраивается по минимуму коэффициента отражения на частоте 12.8 МГц, при одинаковом положении тюнеров. Выбор такой (относительно высокой) частоты уменьшает влияние неточностей юстировки тюнеров, которые могут быть обнаружены и исправлены позже, после завершения вакуумных работ и вакуумного прогрева резонатора, непосредственно перед испытаниями резонатора при высоком уровне ВЧ мощности.

Рисунок 2: Резонаторы ВЧ2 во время испытаний в ИЯФ.

Тренировка мультипакторного разряда

При ускоряющем напряжении равном 4-5 кВ в резонаторе может возникнуть мультипакторный разряд. Интенсивность и точное напряжение этого разряда зависят от частоты на которую настроен резонатор. Экспериментальным путем был выбран режим тренировки разряда на частоте 15 МГц (это близко к максимальной возможной частоте, которую позволяет конструкция резонатора).

При такой настройке мультипактор горит более интенсивно и позволяет более эффективно использовать время тренировки разряда. При этом, в режиме автоматической регулировки уровня напряжения, тренировка разряда может проходить без присутствия оператора.

Время необходимое на тренировку мультипакторного разряда составляет примерно 100-130 часов.

Тренировка при высокой ВЧ мощности

Для повышения электрической прочности зазоров резонатора (и уменьшения уровня автоэмиссии) необходимо тренировать зазоры резонатора ограниченными по энергии пробоями.

Экспериментально была выбрана методика, при которой каждый тюнер тренируется по-отдельности с зазором меньше минимального. Остальные три тюнера обеспечивают работу резонатора при частоте 13 МГц.

Это позволяет получить максимальное напряжение на резонаторе ≈ 32 кВ за счет более высокого шунтового сопротивления, при ограничении мощности усилителя 7.5 кВт.

Типичное изменение вакуума в оттренированном резонаторе, при напряжении 25 кВ, на частоте 11.5 МГц, составляет $2 \div 3 \cdot 10^{-12}$ торр.

Время необходимое на тренировку резонатора при высоких уровнях мощности составляет примерно 40-50 часов и требует постоянного участия оператора.

Текущее состояние дел

В настоящий момент все резонаторы ВЧ2 изготовлены, оттренированы и привезены в ОИЯИ. Четыре резонатора нижнего кольца коллайдера установлены на свои места в туннеле (см. рис.3). Остальные четыре резонатора (верхнего кольца) планируется установить в туннеле осенью 2023 года.

Рисунок 3: Резонаторы ВЧ2 нижнего кольца в тоннеле коллайдера NICA.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА СТАНЦИИ

На рис.4 показана вакуумная схема испытательного стенда станции ВЧ-2.

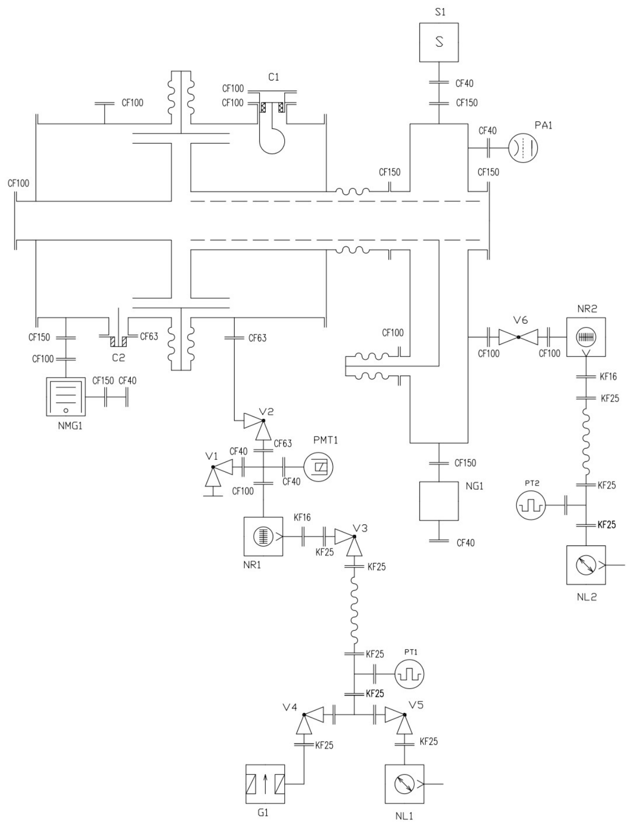


Рисунок 4: Вакуумная схема испытательного стенда станции ВЧ-2.

Основными элементами испытательного стенда являются:

NR1 и NR2 – турбомолекулярный насос Agilent TwisTorr 304 FS;

NMG1 – комбинированный ионно-геттерный насос Agilent VacIon Plus Combination pump 150 StarCell;

NL1 и NL2 – спиральный форвакуумный насос;

NG1 – испаритель титана Agilent TSP;

V2 – вентиль угловой цельнометаллический VAT DN63;

V6 – затвор цельнометаллический VAT DN100;

PA1 – датчик давления высоковакуумный Pfeiffer IMR430;

PMT1 – датчик давления широкодиапазонный;

S1 – квадрупольный масс-спектрометр с умножителем электронов SRS RGA100.

В рабочем состоянии на станции остаются насосы NMG1 и NG1, а также датчик давления PA1. Для повышения эффективности насоса NG1 распыление титана также производится на стенки и внутренние элементы вакуумного объема станции. Для предварительной и черновой откачки во время прогрева используется турбомолекулярный насос NR1. Насос NR2 использовался только для эксперимента по снижению парциального давления аргона.

Для герметизации торцевых фланцев электродов используются металлические упруго деформируемые уплотнители С-образного профиля производства фирмы HTMS.

Все элементы станции проходят финишную очистку в ультразвуковых ваннах и отжиг в вакуумной печи. Поверхность элементов, обращенная к вакууму, подвергается механической и электрохимической полировке. Особенно тщательно полируется поверхность электродов, поскольку это значительно снижает автоэлектронную эмиссию в условиях повышенной напряженности электрического поля, а значит и электрон стимулированную десорбцию с поверхности электродов.

Тестирование станций включает обезгаживающий прогрев при температуре 300°C в течение 2-3 суток. После прогрева производится снятие спектра остаточных газов и проверка на герметичность по гелию. В процессе проверки на станцию надевается полиэтиленовый мешок и наполняется гелием. Допустимый уровень натекания не более 1E-10 мбар л/с.

В процессе тестирования возникли проблемы с высоким содержанием аргона в спектре остаточных газов. При изготовлении станций обширно используется пайка, что может приводить к появлению внутренних полостей с низкой проводимостью. Есть два пути снижения парциального давления аргона в уже изготовленных станциях. Первый - это просто ждать, пока не прокачаются полости. Но на это может потребоваться длительное время. Второй вариант – установить дополнительный насос для откачки аргона (см. рис.6, насос NR2). Для эксперимента был установлен ТМН с компрессией по водороду $1.5 \cdot 10^6$. Давление в станции до открытия насоса было 2.1E-11 Торр, после открытия - 1.7E-11 Торр. Давление аргона снизилось в 5.58 раза, но при этом незначительно повысилось давление водорода.

ВЧ ПИТАНИЕ

Для возбуждения резонаторов ВЧ2 используются твердотельные усилители ВЧ мощности. Усилители спроектированы и изготовлены компанией «Триада ТВ» специально для коллайдера NICA.

Входной сигнал, после предварительного усиления до 200 Вт, делится на четыре канала и подаётся на выходные усилительные кассеты. Усилители выполнены на LDMOS-транзисторах MRFX1K80H с максимальной мощностью 1800 Вт при VDS = 60 В. Для повышения надёжности транзисторы работают с пониженным напряжением питания от 10 до 50В. Для повышения КПД, в зависимости от режима работы, напряжение может меняться. В одной усилительной кассете стандарта 19” высотой 4U установлено четыре транзистора. Мощность, снимаемая с кассеты до 2 кВт. Мощность от четырёх кассет суммируется сумматором Вилкинсона и через направленный ответвитель поступает на выход усилителя. Усилители смонтированы в двух шкафах с общим габаритом ШхГхВ

1000x1200x2000 мм (см. рис.5). В одной сборке размещается два комплекта усилителей мощностью 7кВт каждый для питания двух резонаторов в диапазоне 11-13,5 МГц. Выходы усилителей коаксиальные 50 Ом – EIA 1 5/8”.

Рисунок 5: Два усилителя ВЧ 2 на стенде в ОИЯИ.

В настоящее время усилители полностью изготовлены, хранятся в ОИЯИ и готовы к монтажу.

ЛИТЕРАТУРА

[1] D. Kekelidze et al., “Three Stages of the NICA Accelerator Complex,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 668, p. 012023, Jan. 2016. doi:10.1088/1742-6596/668/1/012023

[2] N. Mityanina “Longitudinal Particle Dynamics and Cooling in NICA Collider”, in Proc. COOL2019, Novosibirsk, Russia, Sep. 2019, pp. 64-67. doi:10.18429/JACoW-COOL2019-THA01

[3] A. Tribendis et al., CONSTRACTION AND FIRST TEST RESULTS OF THE BARRIER AND HARMONIC RF SYSTEMS FOR THE NICA COLLIDER, IPAC2021, Campinas, SP, Brazil. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB365

МОДУЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Д.А. Лякин, С.В. Барабин, Т. В. Кулевой, А.Ю. Орлов, М.С. Саратовских,
НИЦ " Курчатовский институт", Москва
Фильчагин С.В., ФГУП " РФЯЦ - ВНИИЭФ", Саров

Аннотация

Описывается серия устройств для построения систем управления и диагностики пучка линейных и циклических ускорителей с использованием модульных решений. Системы строятся вокруг процессорных оригинальных или коммерческих сборок с установленными в них микросхемами класса SoC (System on Chip). Периферийные модули обеспечивают широкий функционал собираемых устройств. Предпочтительно используется последовательные интерфейсы, что обеспечивает высокую степень взаимозаменяемости и развития систем. Использование в качестве программной части в большой степени унифицированной архитектуры ARM позволяет значительно сокращать затраты на разработку программного обеспечения систем.

СИСТЕМА SOC

В качестве базовых модулей, вокруг которых наращиваются функциональные компоненты систем, используются варианты одноплатных контроллеров на сериях Zynq, Zynq Ultrascale. Данные серии микросхем позиционируются как системы SoC (System on Chip), т.е. системы, объединяющие фон-Неймановские процессоры с программируемой логикой.

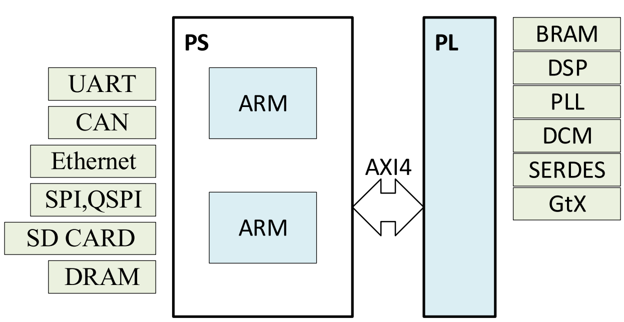


Рисунок 1. Структура SoC Zynq-7000.

При этом, как показано на рисунке 1, программируемая логика не является гомогенным куском транзисторных элементов. Логические функции дополнены функциональными компонентами: память, синхронизация, арифметика. В свою очередь процессорная часть дополнена аппаратными модулями в основном интерфейсного плана.

СТРУКТУРА ПРОЦЕССОРА

Процессор имеет вполне достаточную производительность для выполнения поставленных задач. При тактовой частоте до 630 МГц каждый из процессоров выполняет две инструкции за такт. Вместе с механизмом предсказания программных переходов это дает 2.5 DMIPS/MHz. Чтобы медленная память DDR не замедляла вычисления данные и инструкции, размещаемые в DDR, кэшируются в двухуровневом кэше с коротким циклом доступа. Кэширование происходит автоматически с возможностью включения и отключения. Когда это целесообразно, программист может вручную разместить данные и/или команды в относительно небольшой быстрой памяти процессора OCM. При этом достигается максимальная производительность системы.

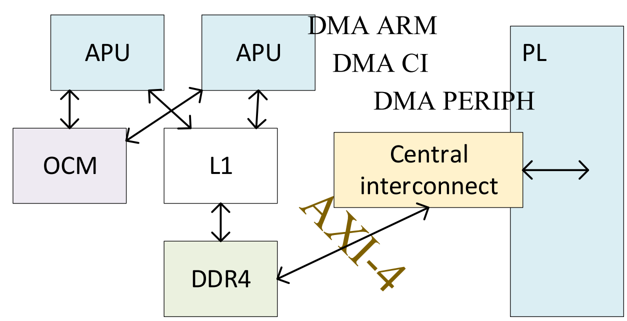


Рисунок 2. Структура памяти процессора.

Структура памяти показана на рисунке 2. Память OCM и DDR доступна также через AXI-мост для разнообразных периферийных устройств ARM архитектуры и произвольных систем программируемой логики PL.

ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР

ВЧ система ускорителей состоит, как правило, из нескольких мощных высокочастотных усилителей, питающих ускоряющие резонаторы. Резонаторы могут иметь равные или кратные рабочие частоты. Задающий генератор позволяет устанавливать требуемые значения амплитуд и фаз в каждом из резонирующих объемов. Дополненный измерительной частью, ЗГ входит в состав систем автоматической регулировки АРФ и АРА. В циклических ускорителях также может замыкаться на систему стабилизации замкнутой орбиты.

Система традиционно строилась по схеме процессор-FPGA [1] [2]. Такой подход позволяет сложную м качественную обработку сигналов [3] Структура ЗГ показана на рисунке 3.

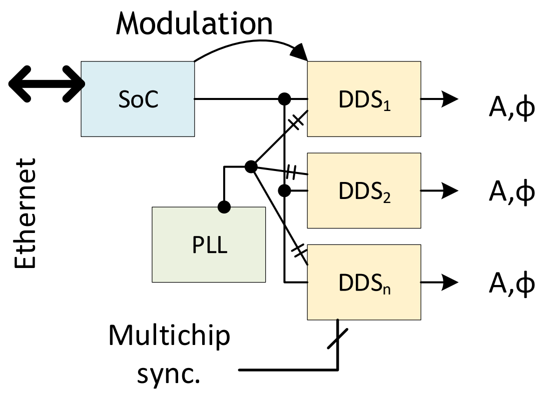


Рисунок 3. Структура задающего генератора.

Согласно принятому модульному принципу построения системы синтезаторы частоты DDS и генератор опорной частоты PLL выполнены в виде отдельных модулей. Все вместе управляется контроллером SoC по последовательной двухпроводной линии. Последовательной линии передачи между SoC и модулями достаточно для задания исходного набора параметров устройств таких, как частота опорного сигнала и содержание внутренних регистров DDS. Дополнительные сигнальные линии требуются для более сложных режимов работы. Для линейных машин это может быть компенсация просадки поля при нагрузке резонатора пучком, для циклических – характерны изменение частоты в течение цикла и необходимость корректировать АЧХ мощных усилительных каскадов, если не предусмотрен отдельный контур обратной связи.

ТАЙМЕР

SoC имеет все необходимое [4] для построение классического варианта таймера для ускорителя (см. рисунок 4). В части программируемой логики PL сформированы счётчики тактов задержки и цифровые компараторы C. Процессорная секция PS записывает время задержки и длительность выходного импульса для каждого из каналов.

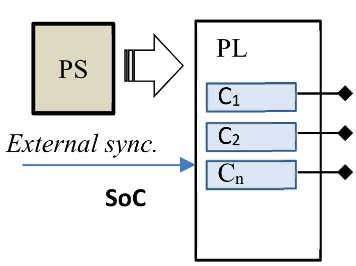


Рисунок 4. Структура таймерного устройства.

При необходимости есть возможность реализовать сложный выходной сигнал в виде последовательности импульсов различной длительности. По данной схеме может быть построен центральный таймер или местный разветвитель таймерных сигналов.

Входной синхронизирующий сигнал может иметь различный формат. В частности, были реализованы IP модули для декодирования таймерных сигналов систем диагностики пучка FESA (CERN) и сигналов в формате MIL_BUS STD [5], использовавшихся в GSI. Поддержка контроллеров сети Ethernet позволяет включать устройства в системы ToE (Time over Ethernet). При подключении сети через гигабитный SFP модуль достигается прецизионная синхронизация подсистем ускорителя.

На практике, системы, описанные здесь способны самостоятельно сформировать требуемые им задержки, что уменьшает потребность в сложном централизованном таймере.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АНАЛОГ-ЦИФРА

Для получения информации о аналоговых сигналах используется комбинация модулей SoC и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Современные АЦП предлагают альтернативу между параллельным и последовательным выводом данных. Выбор делается на основе требований к производительности и к стоимости системы. Базовый вариант для большинства систем ускорителя это комбинация SoC и многоканального А-Ц преобразователя с последовательной шиной данных. Такая сборка находит применение в системах АРЧ, АРА и АРФ, в измерителях положения BPM, индукционных датчиках и пр. Входная полоса частот АЦП достигает 600 МГц, что достаточно для прямого преобразования большинства сигналов.

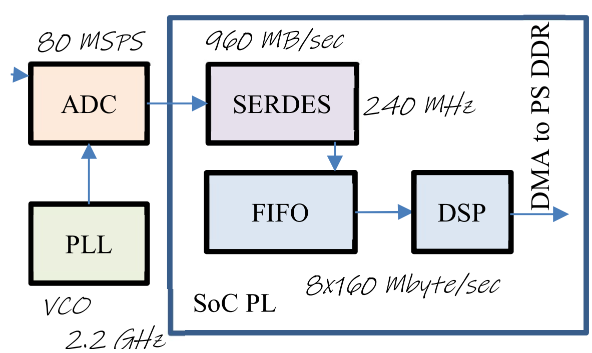


Рисунок 5. Схема получения аналогового сигнала.

ПЛК

Модули SoC естественным образом выполняют функции программируемого логического контроллера. Несколько десятков контактов независимо программируются на ввод или вывод. Требуемые логические связи устанавливаются либо программированием логической матрицы PL, либо выполнением программы процессорами PS.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение модулей включает в себя конфигурацию программируемой логической схемы PL и исполняемый код для процессорных ядер PS.

ИНТЕГРАЦИЯ В СИСТЕМУ

Основным средством интеграции устройств в систему является сеть Ethernet, построенная по иерархическому принципу с повышением производительности от периферийных устройств к вершине пирамиды (см. рисунок 6).

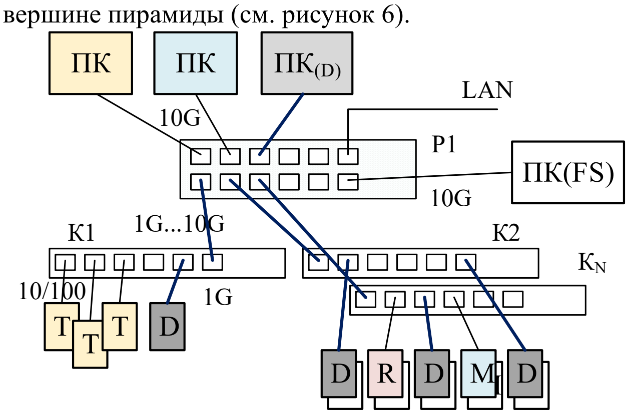


Рисунок 6. Схема включения контроллеров в систему управления и диагностики пучка.

Правильно отобранные и сконфигурированные сетевые устройства выполняют функции среднего слоя транспортной модели процесса. В сети выполняется маршрутизация, арбитраж, буферизация потоков данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модульные решения являются оптимальным вариантом для электронных систем ускорителей. Они допускают высокую степень унификации наиболее сложной части, процессорных модулей с SoC чипами. В то же время оригинальные разработки функциональных модулей в значительной степени упрощаются конструкцией современных микросхем. Так, разработанный модуль 8-канального АЦ преобразователя использует двухслойную плату (см. рисунок 7), поскольку топология базовых элементов ADC и PLL позволяет развести все сигналы в одном слое, оставляя второй в качестве экрана для скоростных полосковых линий и общей защиты от взаимных наводок.

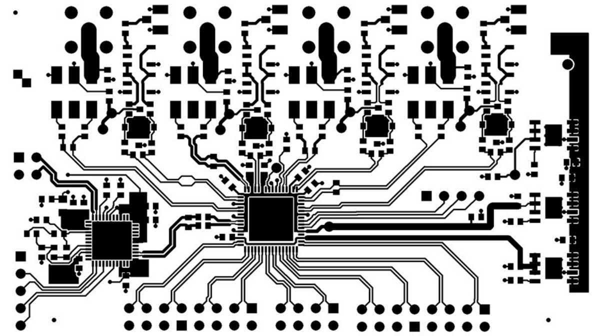


Рисунок 7. Модуль аналого-цифрового преобразователя.

Значительное развитие тема модульной электроники получила в связи с разработкой тяжелоионного ускорителя [6]

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам НТЦ Альфа-1 за логистическую поддержку проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] D. Liakin, S. Barabin and A. Orlov, “A DIGITAL LOW-LEVEL RF SYSTEM FOR RESONANT BEAM,” in *RuPAC 2014*, Obninsk, 2014.

[2] D. Liakin, S. Barabin and A. Orlov, “LOW-LEVEL RF CONTROL AT LIGHT IONS INJECTOR FOR NICA,” in *RuPAC 2018*, Protvino, 2018.

[3] D. Liakin, S. Barabin and A. Orlov, “LOW-LEVEL RF CONTROL AT LIGHT IONS INJECTOR FOR NICA,” in *RuPAC 2014*, Obninsk, 2014.

[4] A. Orlov, D. Liakin, S. Barabin and P. Alekseev, “DEVELOPING OF THE SYNCHRONIZATION SYSTEM FOR,” in *RuPAC12*, st. Peterburg, 2012.

[5] D. Liakin, T. Hoffmann and P. Forck, “A MODULAR VME DATA ACQUISITION SYSTEM FOR COUNTER,” in *DIPAC 2003*, Mainz, 2003.

[6] K. T. et al., “Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ),” in *this conf.*, #172 Novosibirsk, 2023.

МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

В. В. Балакин†[1], А.В. Топчиенко, Н.Н. Лебедев, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

[1]Новосибирский технический государственный университет, Новосибирск, Россия

Аннотация

Инжекционный комплекс является источником электронных и позитронных пучков заряженных частиц на основе линейных ускорителей и накопителя-охладителя. Инжекционный комплекс необходим для функционирования коллайдеров ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. Его ключевыми параметрами являются скорость производства заряженных частиц и параметры пучков при выпуске из накопителя-охладителя в транспортный канал К-500. Для улучшения процесса настройки накопителя-охладителя была модифицирована схема оптической диагностики пучков заряженных частиц. Детали этой работы представлены в данной статье.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Инжекционный комплекс (ИК) [1] состоит из электронной пушки, двух линейных ускорителей (ЛУ), конверсионной системы, накопителя-охладителя (НО) и транспортных каналов К-500, которые соединяют накопитель с бустерами потребителей пучка. Схема инжекционного комплекса представлена на рисунке 1.

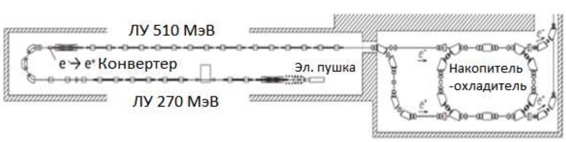


Рисунок 1. Схема инжекционного комплекса

ПРЕДЫДУЩЕЕ РЕШЕНИЕ ВЫВОДА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Схема оптической диагностики до модификации предполагала вывод синхротронного излучения (СИ) пучка из плоскости накопителя вверх, путем установки отражательного зеркала внутри вакуумной камеры. Уже вверху крепился фланец с вакуумным окном, а с помощью еще одного зеркала свет уводился на оптическую систему, установленную сверху поворотного магнита (рисунок 2).

Основным недостатком такой системы являлось то, что при настойке первого отражательного зеркала приходилось вскрывать всю вакуумную систему накопителя, что является трудоемкой процедурой. Кроме того, для каждого направления (позитроны и электроны), строилась своя система, в которой не было места для диссектора. Потому его пришлось устанавливать в соседнее, с залом НО помещение (бункер СИ). Из-за этого, интенсивности света, приходящего на фотокатод диссектора, падала.

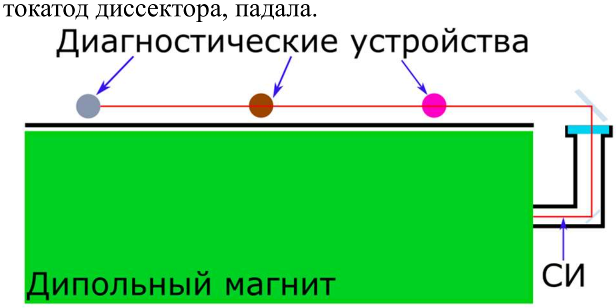


Рисунок 2. Схема оптической системы до модификации. Вид сбоку

Существенной проблемой также являлось то, что вакуумная камера с установленным внутри зеркалом на позитронном направлении была смонтирована неправильно, из-за чего попросту не удавалось довести свет наружу камеры через выходное вакуумное окно.

В связи с перечисленными выше причинами, было решено модифицировать систему оптической диагностики пучка.

МОДИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

В первую очередь было решено заменить сам вывод СИ. Вместо вакуумного зеркала и вывода света наверх было решено поставить сразу вакуумное окно и к общему с ним фланцу прикрепить снаружи зеркало, отражающее пучок света вправо, оставляя его в плоскости накопителя (рисунок 3).

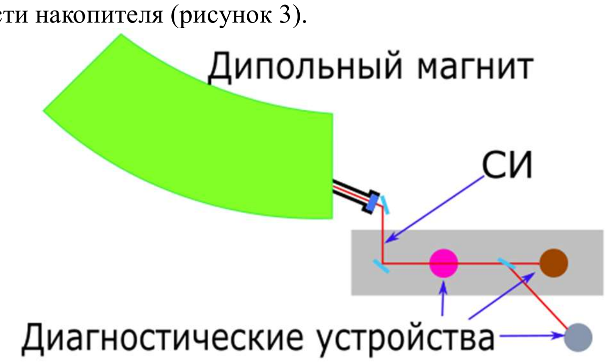


Рисунок 3. Схема позитронной оптической системы после модификации. Вид сверху

† vit.v.balakin@inp.nsk.su.

Находясь в плоскости кольца на ней располагаются по три зеркала и 2 линзы с каждого из направлений (позитронного и электронного), общий диссектор, а 2 ПЗС-камеры подняты над плоскостью накопителя-охладителя.

Расчет оптики для ПЗС-матрицы

Разработка и расчет оптической системы для установки диагностики пучков заряженных частиц на накопителе-охладителе инжекционного комплекса ВЭПП-5 были выполнены в программе «Zemax» [2].

К оптической системе для контроля пучка заряженных частиц предъявлялись следующие технические требования, которые должны быть соблюдены при её проектировании. Для измерения параметров поперечного пучка заряженный частиц используется ПЗС-матрица размером 6.784×5.427 мм. Из-за особенностей расположения магнитных элементов накопителя-охладителя присутствуют фиксированные расстояния от точки излучения СИ до первого зеркала 500 мм и от первого зеркала до расположения второго зеркала 550 мм. С помощью программы «Zemax» изначально была спроектирована параксиальная модель оптической системы, с реализацией реальных компонентов в дальнейшем. Фрагмент оптической системы представлен на рисунке 4.

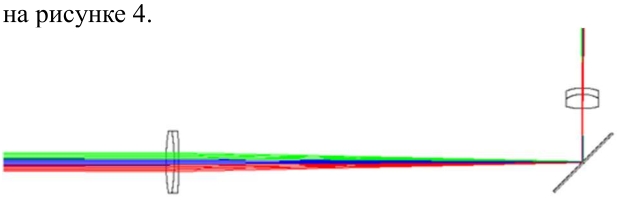


Рисунок 4. Фрагмент оптической системы в «Zemax»

Для оптимизации параметров системы (фокусного расстояния линз, дистанции между ними) были выбраны операторы, которые контролируют:

- EFFL – эффективное фокусное расстояние системы
- EFLY – эффективное фокусное расстояние в локальной Y-плоскости
- AXCL – хроматизм положения в линейных единицах для фокальных оптических систем и в диоптриях для афокальных систем

В качестве критерия качества изображения системы использовался диаметр пятна рассеяния (рисунок 5).

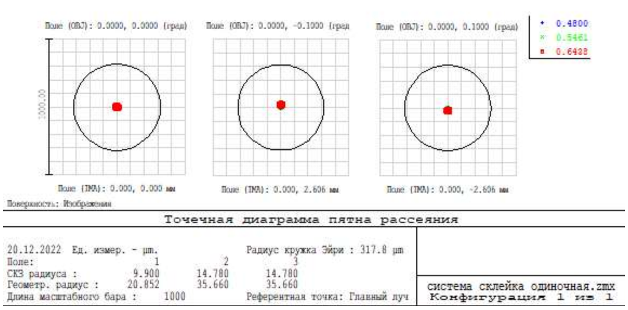


Рисунок 5. Диаграмма пятна рассеяния

Диаметр пятна (21 мкм) оказался во много раз меньше, чем радиус диска Эйри (318 мкм), а аберрации малы. Расчет показал размер изображения пучка заряженных частиц, равный 5.3 мм, что меньше минимального размера ПЗС-матрицы, что полностью соответствует поставленным требованиям [3].

Внедрение объектива с управляемой диафрагмой в систему управления ускорителем

Один из объективов оптической системы (FUJINON DV4x12.5SR4A-SA1L) имеет управляемую диафрагму, для варьирования проходящего сквозь него светового потока. Положение диафрагмы изменяется путем подачи постоянного напряжения на его управляющие катушки.

Для контроля положения диафрагмы было решено использовать контроллер Arduino UNO [4]. Из-за того, что он не имеет полноценного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а только выходы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) была необходимость создания электронной схемы для конвертации ШИМ-сигнала в постоянное напряжение. Эта схема представлена на рисунке 6.

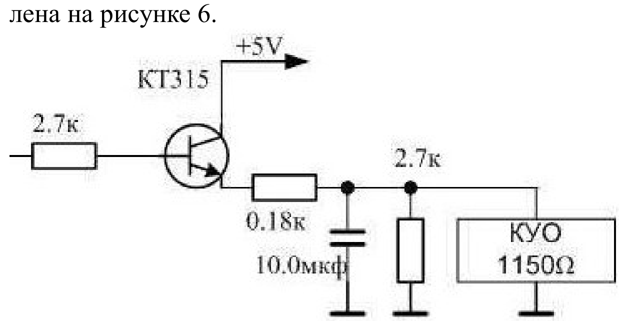


Рисунок 6. Электронная схема конвертации ШИМ-сигнала в постоянное напряжение

Как видно из рисунка, в состав схемы входят резисторы с сопротивлением 2.7 и 0.18 кОм, транзистор КТ315, конденсатор емкостью 10 мкф. На выходе напряжение подается на катушку управления диафрагмой объектива (КУО). Изменение скважности ШИМ-сигнала позволяет варьировать величину выходного напряжения в диапазоне от 0 до 5 В.

Arduino UNO включен в сеть контроллеров инжекционного комплекса, получая свой IP-адрес у DHCP-сервера ИК по его MAC-адресу. С другой стороны, пользовательское приложение для управления состояния диафрагмы получает IP-адрес Arduino у DNS-сервера по присвоенному ему имени и передает ему команды управления через протокол UDP.

Прошивка Arduino UNO рассчитана на прием команд по UDP от пользовательской программы для управления диафрагмой, отсылкой подтверждений выполненных команд и отслеживания текущего состояния диафрагмы путем измерения, поданного на КУО напряжения встроенным АЦП. Также применяется механизм «keepalive» для подтверждения наличия связи с контроллером.

Внедрение ПЗС-камеры в систему управления ускорителем

Ранее изображение пучка заряженных частиц не оцифровывалось, но ввиду необходимости этого установленный ранее аналоговый видеоглазок был заменен на цифровую ПЗС-камеру.

Для получения изображения используется ПЗС-камера IDS UI-5240SE-M-GL Rev. 2. Управляется протоколом GigE Vision через интерфейс Ethernet.

Производитель камеры поставляет ее вместе с программным обеспечением, которое подходит для операционных систем (ОС) семейства Windows и Ubuntu. Ввиду того, что основными ОС в системе управления ИК являются клоны Red Hat Enterprise 7, то для службы, которая занимается управлением параметров ПЗС-камеры, получением и предобработкой данных с нее, была выделена отдельная виртуальная машина на ОС Ubuntu.

Пользовательское приложение реализовано на языке Python 3, отображает зарегистрированное ПЗС-матрицей изображение (рисунок 7) и выводит характерные величины размера пучка, а также позволяет задавать пользователю необходимые параметры ПЗС-камеры (время экспозиции, вариант запуска камеры и т.д.).

Приложение передает команды службе через фреймворк CXv4 [5], используя библиотеку pycx4 [6], а служба использует обертку pyueye [7] для передачи команд ПЗС-камере и получения от нее данных.

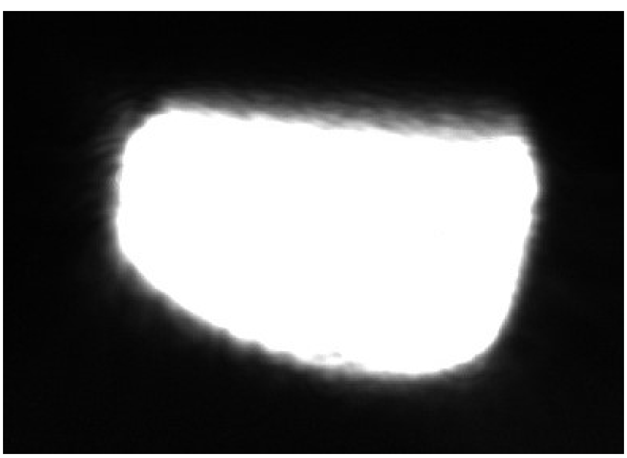


Рисунок 7. Зарегистрированное ПЗС-матрицей синхротронное излучение от пучка позитронов

Изображение пучка заряженных частиц должно иметь вид эллипса, однако на рисунке 7 наблюдаются резко обрезанные края. Наиболее вероятная причина этого заключается в том, что световой пучок обрезается самой вакуумной камерой, по которой излучение проходит от точки излучения до выходного вакуумного окна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье дано описание модификации системы оптической диагностики для накопителя-охладителя инжекционного комплекса ВЭПП-5.

Разработка этой системы включала в себя расчет принципиальной оптической схемы с ее дальнейшей разработкой и оптимизацией системы в программе «Zemax».

Кроме того, было создано программное обеспечение для управления положением диафрагмы в объективе, используемого в оптической системе для поперечной диагностики параметров пучков заряженных частиц. Это обеспечение позволило интегрировать в систему управления ускорителем контроль положения диафрагмы и устанавливать ее в нужное положение отсылая контроллеру Arduino UNO команды по сети «Ethernet» через протокол «UDP».

Также были разработаны служба, которая занимается управлением параметров ПЗС-камеры, получением и предобработкой данных с нее, и пользовательское приложение, отображающее зарегистрированное ПЗС-матрицей изображение и позволяющее задавать пользователю необходимые настройки ПЗС-камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Беркаев, Д.Е. «VEPP-5 Injection Complex: two colliders operation experience» / Д.Е. Беркаев – Текст : непосредственный // «Proc. IPAC’17. Paper WEP1K026». – Т №12 2017 г. С. 2982-2984.

[2] Optical Design Applications Zemax: [сайт]. URL: https://www.zemax.com/.

[3] Топчиенко, А. В. Разработка оптической системы установки для диагностики параметров пучков заряженных частиц : специальность 12.04.02 «Оптотехника» : магистерская выпускная квалификационная работа / Топчиенко Александра Венеаминовна ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2023. – 62 с.

[4] Open-source electronics platform Arduino: [сайт]. URL: https://www.arduino.cc/

[5] Bolkhovityanov, D. CXv4, a modular control system. / D. Bolkhovityanov, P. Cheblakov, F. Emanov. —// Proceedings of the 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (Melbourne, Australia). — Melbourne, 2015. — P. 915-918. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/ICALEPCS2015/papers/wepgf093.pdf.

[6] Bolkhovityanov, D VEPP-5 injection complex control system base software upgrade. / D. Bolkhovityanov, F. Emanov. — // Proceedings, 26th Russian Particle Accelerator Conference (Protvino, Russia). — Protvino, 2018. — P. 417-419. — URL: https://accelconf.web.cern.ch/rupac2018/papers/thpsc07.pdf.

[7] Python bindings for uEye API pyueye: [сайт]. – URL: https://pypi.org/project/pyueye/

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПУЧКА ВЭПП-4М В ОБЛАСТИ $\Upsilon(1S)$ ПИКА МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ С ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЯРИМЕТРОМ

В.Е. Блинов[1,2,3], С.А. Захаров[1], В.В. Каминский[1,2], В.Н. Кудрявцев[1],
С.А. Никитин[1], И.Б. Николаев*[1,2], П.А. Пиминов[1], Л.И. Шехтман[1]
[1] ИЯФ СО РАН, 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11
[2] НГУ, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1
[3] НГТУ, 630092, Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20

Аннотация

Ускорительный комплекс ВЭПП-4М [1] с детектором КЕДР [2] готовится к прецизионному измерению масс и лептонных ширин семейства Υ-мезонов. Для измерения энергии пучка методом резонансной деполяризации мы создали установку «Лазерный поляриметр». Она позволяет измерять энергию пучка вблизи $\Upsilon(1S)$ пика (4.7 ГэВ) каждые полчаса с относительной точностью $3 \cdot 10^{-6}$ во время набора данных детектором КЕДР.

ВВЕДЕНИЕ

Табличное значение погрешности измерения массы $\Upsilon(1S)$-мезона, после переобработки экспериментов МД-1 и CUSB в работе [3], на основе уточнённых массы электрона, радиационных поправок и интерференции, составляет 100 кэВ. В новом измерении планируется в два раза улучшить этот результат. Для этого требуется система измерения энергии пучка ВЭПП-4М с точностью ~ 10 кэВ. Самым точным методом измерения энергии релятивистского пучка является метод резонансной деполяризации [4]. Суть метода заключается в измерении частоты спиновой прецессии электрона Ω_s в магнитном поле накопителя, которая связана со средней энергией пучка E:

$$\Omega_s = \omega_{\text{rev}} \left(1 + \frac{E}{m_e c^2} \frac{\mu'}{\mu_0}\right) = \omega_{\text{rev}}\, n \pm \omega_d, \qquad (1)$$

где $\omega_{\text{rev}} = 818$ кГц (на ВЭПП-4М) – это частота обращения пучка в накопителе; m_e – масса электрона; μ' и μ_0 – аномальная и нормальная части магнитного момента электрона; ω_d – резонансная частота внешнего электромагнитного поля, при которой происходит разрушение поляризации пучка; n – произвольное целое число. Высокая точность метода обеспечивается малой шириной спиновой линии ($5 \cdot 10^{-6}$ для ВЭПП-4М на энергии 4.7 ГэВ) и тем, что масса электрона и его аномальный магнитный момент известны с относительной погрешностью $\delta m_e = 3 \cdot 10^{-10}$, $\delta\mu' = 10^{-10}$. Поправки к формуле (1) из-за некоммутативности поворотов спина в условиях вертикальных искажений орбиты, а также связь средней энергии электронного пучка с энергией центра масс сталкивающихся электронов и позитронов требуют отдельного изучения и не рассматриваются в этой работе.

На низкой энергии, т.е. в области энергии ψ-мезонов, на ускорителе ВЭПП-4М поляризация определяется по интенсивности внутрисгусткового рассеяния [5]. Однако сечение внутрисгусткового процесса быстро падает с ростом энергии [6]. Поэтому для измерения поляризации на высокой энергии используется процесс обратного комптоновского рассеяния. Метод основан на измерении асимметрии рассеяния циркулярно поляризованных фотонов на вертикально поляризованном релятивистском электроне. Данный способ измерения поляризации был предложен в работе [7], а затем использовался для измерения энергии в экспериментах по прецизионному измерению масс Υ-мезонов, W- и Z-бозонов. Для длины волны фотонов 527 нм на энергии рождения Υ-мезона (4.7 ГэВ) с учётом углового разброса электронов в пучке величина асимметрии составляет: $P \cdot V \cdot E \cdot \hbar\omega_0/(m_e c^2)^2 \simeq 1\%$ где $\hbar\omega_0$ – энергия налетающего на электрон фотона, P – степень поперечной поляризации электрона, V – параметр Стокса циркулярной поляризации фотонов.

ЛАЗЕРНЫЙ ПОЛЯРИМЕТР

Лазерный поляриметр [8] располагается вблизи экспериментального промежутка ВЭПП-4М (рис. 1). В качестве источника фотонов используется твердотельный импульсный лазер на основе легированного неодимом кристалла иттрий-литиевого фторида (Nd:YLF) со светодиодной накачкой. Длина волны 527 нм, средняя мощность лазера 2 Вт, максимальная частота повторения импульсов 4 кГц, длительность импульса 5 нс. При помощи $\lambda/4$ фазовой пластинки формируется циркулярная поляризация лазерного луча. Переключение между левой и правой поляризациями осуществляется KD*P ячейкой Поккельса с полуволновым напряжением 3.1 кВ. Далее при помощи экспандера и дистанционно управляемого зеркала лазерный луч фокусируется на электронном сгустке. Обратно рассеянные комптоновские гамма-кванты после конвертации в электрон-позитронные пары в 12 мм свинца регистрируются при помощи двухкоординатного детектора на основе тройных ГЭУ (GEM) [9]. Размер чувствительной области детектора составляет $64 \times 20\,\text{мм}^2$ с размером пикселя

* I.B.Nikolaev@inp.nsk.su

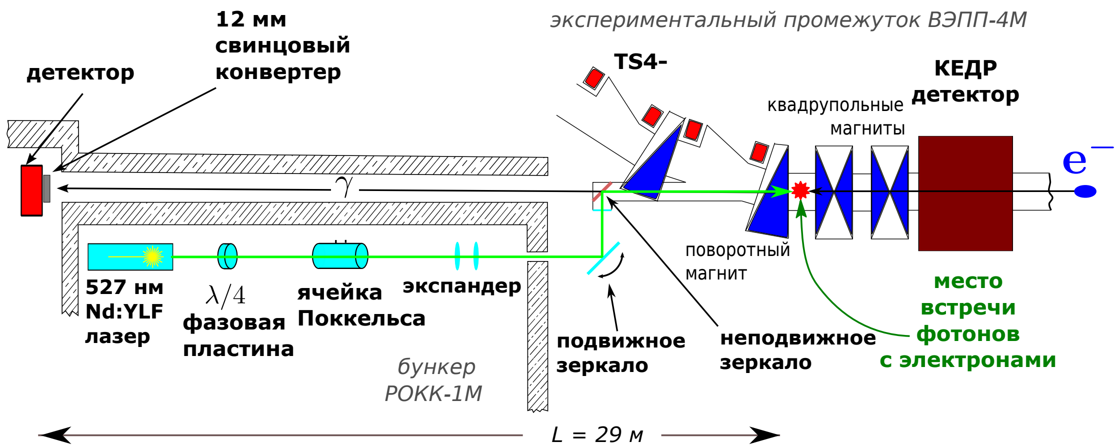


Рис. 1: Схема установки «Лазерный поляриметр».

2×1 мм^2. Данные с детектора по триггеру оцифровываются и отправляются на обработку в компьютер.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Распределение зарегистрированных гамма-квантов в детекторе $\frac{dN}{dx\,dy}(x, y)$ по координате определяется угловым распределением комптоновского рассеяния $\frac{d\sigma}{d\theta_x d\theta_y}(\theta_x, \theta_y)$ и, кроме того, зависит от пространственного и углового распределения электронного и лазерного сгустков; от конверсии и многократного рассеяния гамма-квантов в веществе до детектора. В общем случае эту зависимость можно выразить в виде интегрального преобразования с ядром $B(x, y, \theta_x, \theta_y)$. Однако, если пренебречь потерями гамма-квантов при пролёте через вещество и неоднородностью детектора, то ядро преобразования можно записать в приближенном виде: $B(x - \theta'_x L,\ y - \theta'_y L)$, где L – средняя длина пролёта гамма-квантов от места встречи до детектора. Тогда распределение гамма-квантов по координате можно представить в виде свёртки:

$$\frac{dN}{dxdy}(x, y) \approx B(x, y) \otimes \frac{d\sigma}{dxdy}\left(\frac{x}{L}, \frac{y}{L}\right). \tag{2}$$

$B(x, y)$ можно определить непосредственно из экспериментальных данных. Рассмотрим дискретный Фурье образ суммы нормированных распределений $D^{l,r}$ частиц в детекторе для левой (l) и правой (r) поляризаций, а также образ суммы распределений комптоновских фотонов $C^{l,r}$:

$$\hat{D} = \mathscr{F}\left[D^l + D^r\right], \qquad \hat{C} = \mathscr{F}\left[C^l + C^r\right], \tag{3}$$
$$D^{l,r} = \frac{1}{N_{l,r}} \frac{dN^{l,r}}{dxdy}(x, y), \qquad C^{l,r} = \frac{d\sigma^{l,r}}{dxdy}\left(\frac{x}{L}, \frac{y}{L}\right),$$

где $\mathscr{F}$ и $\hat{}$ обозначают дискретное Фурье-преобразование; $N_{l,r}$ – нормировочные параметры видимого распределения, соответствует значения которых определяются из процедуры аппроксимации. При хорошей настройке переключения поляризации лазера, при которых параметры Стокса меняют знак, сумма не содержит поляризационных вкладов. Тогда ядро $B(x, y)$ можно определить через обратную свёртку с регуляризацией (фильтрация Винера [10]):

$$B(x, y) \approx \mathscr{F}^{-1}\left[\frac{\hat{D} \cdot \hat{C}^*}{|\hat{C}|^2 + k_{\text{reg}} \sum |\hat{C}|^2}\right], \tag{4}$$

здесь $\mathscr{F}^{-1}$ обозначает обратное преобразование Фурье; $\hat{C}^*$ – комплексное сопряжённое к $\hat{C}$; $k_{\text{reg}} \approx 10^{-4}$ – параметр регуляризации подбираемый из аппроксимации хороших данных. Суммирование $\sum |\hat{C}|^2$ ведётся по всему пространству, на котором определены Фурье-образы.

Подгонка (аппроксимация) осуществляется с использованием разницы распределений для левых и правых поляризаций, которая несёт информацию о поляризации пучка:

$$\Delta D(x, y) = D^l - D^r, \quad \Delta C(x, y) = C^l - C^r \tag{5}$$

путем минимизации функции:

$$\chi^2 = \sum_{x,y} \frac{\left(\Delta D \cdot (B \otimes C) - D \cdot (B \otimes \Delta C)\right)^2}{4\,(B \otimes C^r)^2 \frac{D^l}{N_l} + 4\,(B \otimes C^l)^2 \frac{D^r}{N_r}}. \tag{6}$$

Из подгонки определяется четыре свободных параметра: P – вертикальная поляризация электронного пучка, Q – параметр Стокса линейной поляризации фотонов, β – угол поворота линейной поляризации и $\delta N = (N_L - N_R)/(N_L + N_R)$ – относительная разница нормировок для левой и правой поляризаций. На рис. 2 изображен пример такой двумерной подгонки. Наличие поляризации электронного пучка можно увидеть по «волне» в вертикальной проекции разницы распределений для левой и правой поляризаций.

ДЕПОЛЯРИЗАТОР

Для деполяризации пучка мы используем ТЕМ-волну, создаваемую парой пластин расположенных в техниче-

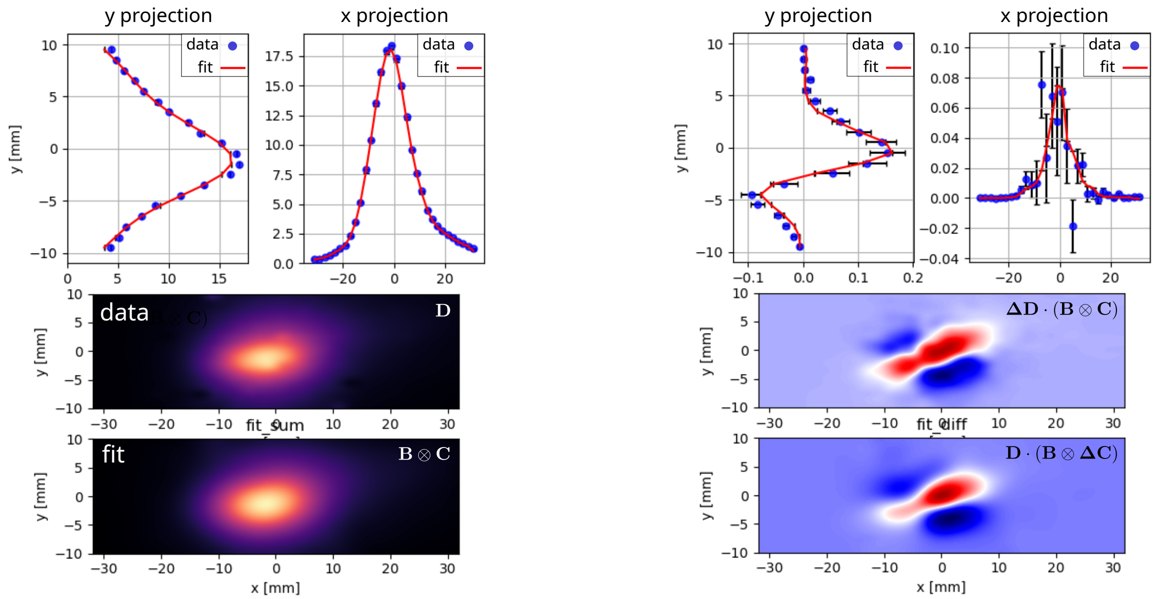


Рис. 2: Пример подгонки двумерных распределений гамма-квантов в детекторе. Слева изображено сравнение данных $D(x, y)$ и применяемой модели $B \otimes C$. Справа показано сравнение «данных» $\Delta D \cdot (B \otimes C)$ и «модели» $D \cdot (B \otimes \Delta C)$.

ском промежутке ВЭПП-4М недалеко от резонаторов. Они имеют длины $l_d = 830$ мм и зазор между ними $d_d = 40$ мм. На рис. 3 изображена схема формирования стоячей ТЕМ-волны. Управляемый компьютером синтезатор синусоидального сигнала амплитудой 1 В поступает на управляемый компьютером аттенюатор (ослабление до 60 дБ). После чего усиливается усилителем в 100 раз и приходит на пластины деполяризатора. Для обеспечения точности измерений синтезатор частоты, задающий генератор ВЧ ВЭПП-4М, система измерения ведущего магнитного поля методом ЯМР стабилизированы рубидиевым стандартом времени и частоты, имеющим абсолютную точность 10^{-10}. Экспериментальным путём подобран режим работы деполяризатора: скорость сканирования 1 кэВ/с, ослабление аттенюатора 28 дБ и диапазон сканирования 900 кэВ. В этом режиме исключается деполяризация на возможных боковых паразитных гармониках, обеспечивается требуемая точность измерения энергии и перекрывается неопределённость энергии пучка. Величина функции спинового отклика $|F^\nu|$ [11, 12] для этого деполяризатора на энергии 4.7 ГэВ равна приблизительно 150, а амплитуда гармоники деполяризатора w_k при напряжения на пластинах $U = 0.04$ В равна: $w_k = \frac{\nu U |F^\nu| l_d}{2\pi d_d H\rho} \approx 4 \cdot 10^{-6}$, где $H\rho \approx 1.6 \cdot 10^4$ кГс·см – магнитная жёсткость ускорителя, $\nu = \Omega_s/\omega_{\text{rev}}$. Характерное время деполяризации $\tau_d \approx (\pi\omega_{\text{rev}}|w_k|^2 \cdot 440.648\,\text{МэВ}/\sqrt{2\pi}\sigma_s)^{-1} \approx 20$ с, где $\sigma_s \approx 22$ кэВ это расчётная полуширина спиновой линии в энергетических единицах.

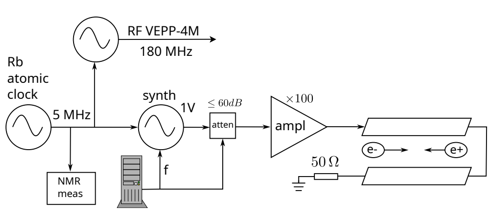


Рис. 3: Схема формирования стоячей ТЕМ-волны на пластинах деполяризатора.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ

На рис. 4 показаны измерения энергии во время набора данных детектором КЕДР при предварительном сканировании $\Upsilon(1S)$-мезона в мае 2023 года. Все четыре измерения энергии сделаны на одном пучке. После ускорения электронов и позитронов до рабочей энергии начинается процесс радиационной поляризации [13], при этом пучки разведены и набор данных детектором КЕДР не идёт. На энергии $\Upsilon(1S)$-мезона в ВЭПП-4М время радиационной поляризации в идеальном случае составляет 40 минут. Примерно через полчаса, когда

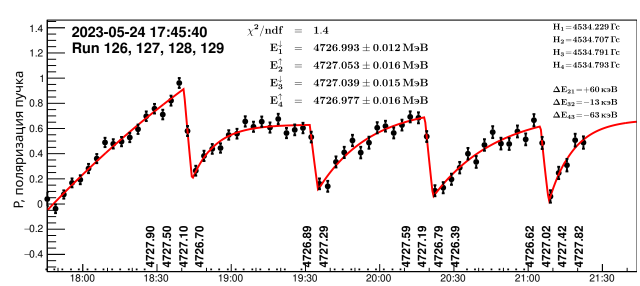


Рис. 4: Прецизионные измерения энергии во время набора данных детектором КЕДР.

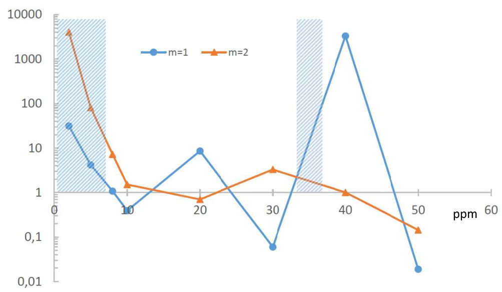


Рис. 5: Отношение времён деполяризации на первом и втором 50 Гц модуляционных резонансах к аналогичному времени на основном в зависимости от амплитуды пульсаций. Штриховкой указаны области, где деполяризацию на первых боковых резонансах можно исключить, уменьшая силу деполяризатора.

степень поляризации пучка становится достаточной для измерения поляризации, начинается сканирование по частоте деполяризатора, что показано в виде подписей в энергетических единицах около шкалы времени. После скачкообразного уменьшения поляризации и определения энергии, пучки электронов и позитронов сводятся, появляется светимость и начинается набор данных детектором КЕДР. При этом снова начинается процесс радиационной поляризации и затем делается следующее измерение энергии и т.д. Для подавления систематического сдвига частоты деполяризации, вызванного шириной спиновой линией ($\pm$22 кэВ) а также возможной деполяризацией на паразитных боковых $\pm$50 Гц ($\pm$27 кэВ) резонансах необходимо менять направление сканирования после каждого измерения энергии. Желательно иметь пульсации основного поля меньше 10^{-5}, в противном случае амплитуда паразитной 50 Гц гармоники становится больше амплитуды основной спиновой линии (рис. 5).

Сразу после ускорения основное поле дрейфует в течение получаса на величину около 0.5 МэВ. Поэтому, помимо ожидания радиационной поляризации пучка, мы вынуждены дожидаться релаксации поля. Среднеквадратичный дрейф орбиты между измерениями энергии составляет около 100 мкм, что соответствует дрейфу энергии 14 кэВ. При проведении этих измерений не работала термостабилизация ВЭПП-4М из-за высокой температуры окружающей среды, поэтому во время набора данных наблюдался дрейф температуры около 3°C, что отражается в разнице энергий последовательных измерений энергии (60 кэВ). Мы ожидаем, что в холодное время года возможно добиться стабилизации температуры ~ 0.2°C, что соответствует дрейфу около 10 кэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана установка «Лазерный поляриметр» для калибровки энергии пучка коллайдера ВЭПП-4М для планируемого эксперимента по измерению массы и лептонной ширины $\Upsilon(1S)$-мезона. Система позволяет несколько раз измерять энергию пучка прямо во время набора данных детектором КЕДР. Степень поляризации измеряется с точность 5 – 10% за 50 секунд в зависимости от величины тока электронного пучка в ВЭПП-4М. Точность калибровки составляет 15 кэВ ($3 \cdot 10^{-6}$) каждые полчаса. Для улучшения точности определения энергии в планируемом эксперименте по измерению массы необходима термостабилизация ВЭПП-4М, стабилизация источников питания и контроль пульсаций основного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] A. N. Zhuravlev и др., «Current Status of the VEPP-4 Accelerator Facility», *Phys. Part. Nucl. Lett.*, т. 17, № 7, с. 938—950, 2020, {10.1134/S1547477120070067}

[2] V. V. Anashin, V. M. Aulchenko, E. M. Baldin, A. K. Barladyan, A. Y. Barnyakov и др., «The KEDR detector», англ., *Phys.Part.Nucl.*, т. 44, с. 657—702, 2013, 10.1134/S1063779613040035

[3] A. G. Shamov и O. L. Rezanova, «Revision of results on $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, and $\Upsilon(3S)$ masses», *Physics Letters B*, т. 839, с. 137 766, 2023, https://doi.org/10.1016/j.physletb.2023.137766

[4] А. Д. Букин и др., «Метод абсолютной калибровки энергии пучков. Измерение массы Φ мезона.», *Высокие энергии и элементарные частицы. Дубна. ОИЯИ.*, с. 138, 1975, Труды V международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц.

[5] V. Blinov и др., «Absolute calibration of particle energy at VEPP-4M», *Nucl. Instrum. Meth.*, т. A494, с. 81—85, 2002, 10.1016/S0168-9002(02)01449-3

[6] С. Никитин и И. Николаев, «Расчёт интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М», *ЖЭТФ*, т. 142, № 1, с. 44—55, 2012.

[7] В. Н. Байер и В. А. Хозе, «Об определении поперечной поляризации электронов большой энергии», *Ядерная Физика*, т. 9, с. 409, 1969.

[8] V. E. Blinov и др., «Status of laser polarimeter at VEPP-4M», *Journal of Instrumentation*, т. 15, № 08, с. -08024, 10.1088/1748-0221/15/08/c08024

[9] V. V. Kaminskiy, V. N. Kudryavtsev, I. B. Nikolaev, L. I. Shekhtman и S. A. Zakharov, «The GEM-based detector for tracking the Compton-scattered photons in the Laser Polarimeter facility at VEPP4-M collider», *Journal of Instrumentation*, т. 15, № 08, с. -08019, 10.1088/1748-0221/15/08/C08019

[10] A. Murli, L. D'Amore и V. De Simone, «The Wiener filter and regularization methods for image restoration problems», в *Proceedings 10th International Conference on Image Analysis and Processing*, 1999, с. 394—399, 10.1109/ICIAP.1999.797627

[11] Y. S. Derbenev, A. M. Kondratenko и A. N. Skrinsky, «Radiative polarization at ultrahigh-energies», *Part. Accel.*, т. 9, с. 247—266, 1979.

[12] S. Nikitin, *Calculation of depolarizer with transverse field for precision experiment at VEPP-4M*, preprint BINP SB RAS (in Russian) 2005-054, 2005.

[13] A. A. Sokolov и I. M. Ternov, «On Polarization and Spin Effects in Synchrotron Radiation Theory», *Sov. Phys. Dokl*, т. 8, с. 1203—1205, 1964.

QUALITY FACTOR CHARACTERIZATION OF SUPERCONDUCTIVE LOW-BETA 325 MHZ HALF-WAVE RESONATORS AT LOW MICROWAVE FIELD AMPLITUDES

D. Bychanok[1]*, E.Gurnevich, A. Sukhotski, G.Walynets, S. Huseu, S. Maksimenko
Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus
V. Petrakovsky, A. Pokrovsky, I. Pobol, V. Zaleski
Physical-Technical Institute, Minsk, 220141, Belarus
Y. Tamashevich
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, D-14109, Germany
M. Gusarova, M. Lalayan, S. Polozov
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
D. Nikiforov, Y. Bespalov A. Butenko, E. Syresin, G.Trubnikov
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia
[1]also at Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract

A niobium prototype of a 325 MHz coaxial half-wave resonator with $\beta = 0.21$ has been designed, manufactured, and tested at low microwave field amplitudes. The electromagnetic properties in the superconductive state were investigated in a continuous wave regime and the decay mode using an RF generator and power detectors. The features of the cavity response in the superconducting state are analyzed for quality factor estimation. The experimentally measured quality factor of the studied prototype is $Q_0 = (3.5 \pm 0.1) \cdot 10^8$ at microwave power values up to +20 dBm.

INTRODUCTION

Coaxial half-wave resonators (HWRs) are widely used as part of superconducting accelerator sections for heavy charged particles [1, 2]. In this communication, we present the results of cooperation between JINR, NRNU MEPhI, INP BSU, and PTI NASB in the design, development, production, and characterization of HWR prototype operating at frequency 325 MHz for the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) injector. Cavity was designed and produced in classical coaxial HWR configuration (Fig. 1(a)) with an integrated helium vessel [3].

The low-power RF measurements are an important intermediate step during the cavity fabrication process. The frequency-domain methods for HWR's intermediate RF-characterization are usually based on the use of vector network analyzers (VNA). VNA is a fast and convenient tool to control the resonant frequency during initial "warm" tests [3,4]. Nevertheless, the use of VNAs is severely limited when characterizing the properties of high-Q systems. Coaxial half-wave resonators in the superconducting state have a typical Q-factor over 10^8 and VNAs do not give satisfactory results for their characterization. Another measurement system based on stable generators and power meters is traditionally used for HWR characterization in this case. The

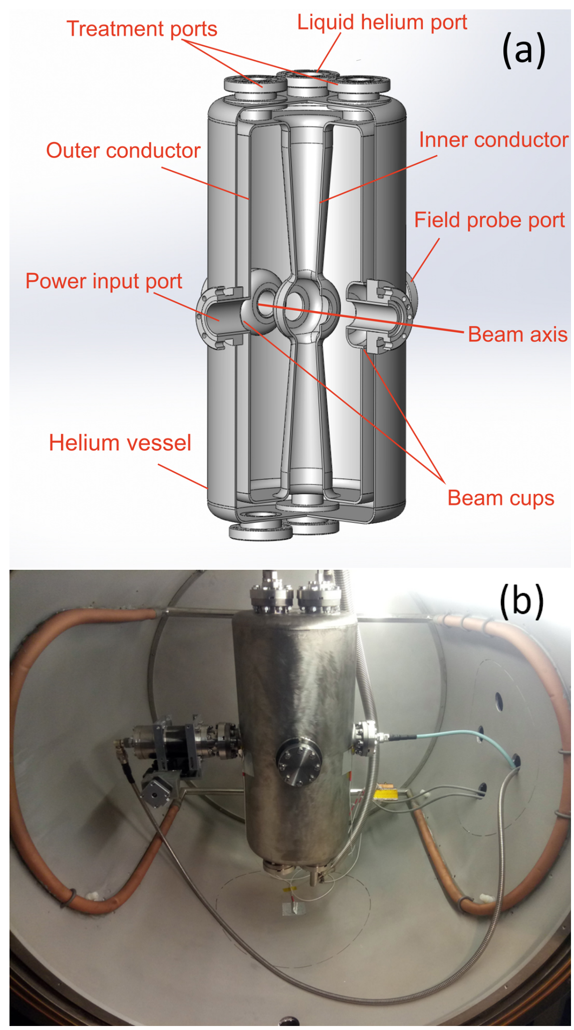


Figure 1: (a) 3D sketch of the coaxial half-wave resonator with the designation of main parts; (b) assembled cavity with power input and pickup antenna in the test cryomodule.

* dzmitrybychanok@yandex.by

corresponding features of HWR RF measurements in continuous wave (CW-mode) and in decay mode are presented in the sections below.

EXPERIMENTAL SETUP FOR CAVITY RF-CHARACTERIZATION

The test cryomodule [5] was designed to effectively perform intermediate vacuum-, temperature- and RF tests of HWR. The general view of the assembled cavity with power input and pickup antenna in the test cryomodule is presented in Fig.1(b).

The frequency-domain measurements using modern VNA allow to performance of satisfactory characterization of cavities with Q-factor up to 10^7. For measurements of higher-quality systems, another experimental setup is used (see block diagram in Fig. 2). It is based on a highly stable RF generator, power sensors, directional couplers, and a phase look loop (PLL) for frequency stabilization.

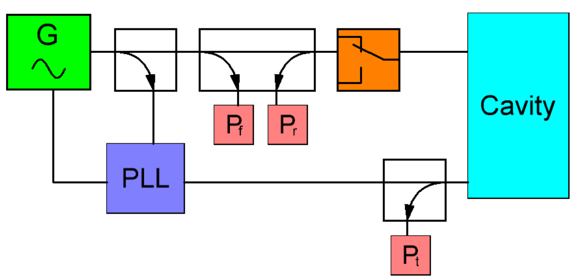


Figure 2: The block diagram of a stand for quality factor measurements.

The signal from the generator is supplied to the power input of the cavity. Using dual-directional coupler it is possible to measure forward, reflected, and transmitted through the cavity power. In CW-mode, these quantities can be used for the estimation of the power input coupling coefficient.

THE MODEL FOR Q-FACTOR ESTIMATION

According to Fig.2, the experimentally measured quantities are forward, reflected, and transmitted power P_f, P_r, P_t, correspondingly. The general relations between P_f, P_r, P_t and the main characteristics of SRF cavities can be found in [6, 7]. Applying them to studied low-β resonators gives the following equations for the quality factor Q_0:

$$Q_0 = Q_L \left[1 + \beta \left(1 + \frac{P_t}{P_{diss}} \right) + \frac{P_t}{P_{diss}} \right], \qquad (1)$$

where β is the coupling coefficient, P_{diss} is the power loss on the walls of the resonator, Q_L is the loaded quality factor

$$\beta = \frac{1 - \sqrt{P_r/P_f}}{1 + \sqrt{P_r/P_f}}, \qquad (2)$$

$$P_{diss} = P_f - P_r - P_t. \qquad (3)$$

For time-domain experiments, Q_L can be obtained, for example, from decay time τ measurements. After turning off RF power in CW-mode the power sensors can measure the change in RF power from the pickup antenna and power input over time. This process is well described by the exponential law and its decay time τ can be easily estimated. In this case, $Q_L = 2\pi f \tau$, where f - is the operating frequency. For frequency-domain experiments, Q_L can be calculated from VNA-measured S_{21} spectra $Q_L = f/\Delta f$, where Δf is full width at half maximum.

THE EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF NIOBIUM PROTOTYPE

CW-mode provides information about energy balance in HWR. Based on CW-mode results it is possible to obtain information about coupling coefficient β and estimate the term in square brackets in Eq.(1). To obtain the term Q_L it is necessary to switch off the generator and measure the decay of oscillations in the cavity. In the experiments below together with the generator switch off we also switched channels P_f band P_r to the mismatched load. Thus, energy losses in the resonator were generally determined by losses on the niobium surface. The antenna quality factor was about 10^{10}.

The typical result for measurements in CW-mode and in decay mode for the studied HWR prototype is presented in Fig.3 (left and right part, correspondingly).

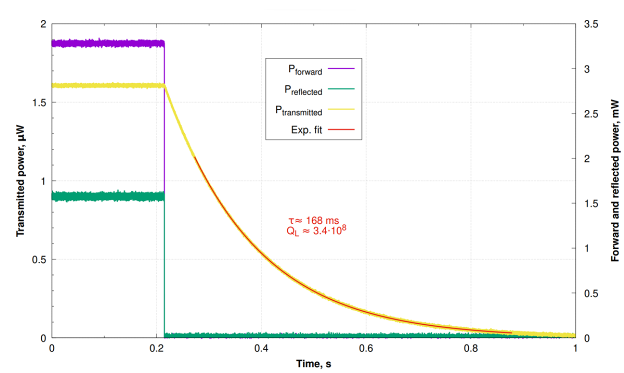


Figure 3: The time domain measurements in CW-mode and decay-mode.

These results allow us to estimate the quality factor $Q_0 = (3.5 \pm 0.1) \cdot 10^8$. This value is about 3 times less than the theoretically expected value $Q_0 \sim 10^9$ at 4.2K. The possible reason is the low microwave field amplitudes used in the experiment. According to [8] this effect is well known for elliptical 1.3 GHz cavities and called *low field Q slope* (LFQS). Further experiments with higher forward power can provide more information about LFQS for 325 MHz HWR cavities.

CONCLUSIONS

The results presented above demonstrate the possibility of producing superconducting resonators in Belarus and Russia for accelerator applications. The joint efforts of JINR, NRNU MEPhI, INP BSU, and PTI NASB led to the creation of a working prototype of the HWR with characteristics close to design ones. The experimentally measured quality factor of the HWR prototype at low microwave amplitudes was $Q_0 = (3.5 \pm 0.1) \cdot 10^8$ at microwave power values up to +20 dBm. The presented results will be used for the further development and manufacturing of niobium 325 MHz HWR cavities for the NICA project.

ACKNOWLEDGEMENTS

DB is thankful for support by Tomsk State University Competitiveness Improvement Program. The work was supported by JINR, Russia (Theme 02-0-1065-2007/2023 of Topical plan for JINR research and international cooperation).

REFERENCES

[1] A. Facco, F. Scarpa, D. Zenere et al.,V. “Low- and intermediate-beta, 352 MHz superconducting half-wave resonators for high power hadron acceleration”, Phys. Rev. ST Accel. Beams, 9, Nov. 2006, p.110101. doi:10.1103/PhysRevSTAB.9.110101

[2] J. R. Delayen, C. L. Bohn and C. T. Roches, ”Niobium resonator development for high-brightness ion beam acceleration,” in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 27, no. 2, pp. 1924-1927, March 1991, doi: 10.1109/20.133578

[3] A. Butenko, *et al.*, ”Status of the sc hwr cavities production for NICA project”, XXVII RUSSIAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE from 27 September to 1 October 2021 P. THA01.

[4] D. Bychanok, *et al.*, ”Control of elec-tromagnetic properties during prototyping, fabrication and operation of low-beta 325 MHz half-wave resonators”, J. Phys. D: Appl. Phys., 54(25), 255502, 2021, doi:10.1088/1361-6463/abf168.

[5] D. Bychanok, *et al.* ”Design and characteristics of cryostat for testing of low-beta 325 MHz half-wave resonators”, XXVII RUSSIAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE from 27 September to 1 October 2021, MOPSA16.

[6] H. Padamsee, J. Knobloch, and T. Hays, Rf superconductivity for accelerators john wiley and sons, Inc., New York, 199 (1998).

[7] T. Powers, Practical aspects of srf cavity testing and operations (2011) pp. 60–63.

[8] A. Romanenko, and D. I. Schuster. ”Understanding quality factor degradation in superconducting niobium cavities at low microwave field amplitudes.” Physical Review Letters 119.26 (2017): 264801.