

Федеральный исследовательский центр  
«Институт катализа им. Г. К. Борескова  
Сибирского отделения Российской академии наук»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО  
ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ «СКИФ»

Сборник статей

Под общей редакцией К. И. Шефер

В трех томах

Том 2

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Составитель Е. Б. Левичев

Новосибирск

2022

УДК 621.384.63:539.122(082)

ББК 22.38я4

Т38

Т38 **Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ» :** сборник статей : в 3 томах / Федер. исслед. центр «Ин-т катализа им. Г. К. Борескова Сиб. отд-ния Рос. акад. наук» ; под общ. ред.: К. И. Шефер. – Новосибирск : Ин-т катализа СО РАН, 2022.

ISBN 978-5-906376-40-4.

Т. 2 : Ускорительный комплекс / сост. Е.Б. Левичев. – 374 с.

ISBN 978-5-906376-42-8.

В сборнике статей описана технологическая инфраструктура строящегося в рабочем поселке Кольцово источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ», включающей ускорительный комплекс (инжектор и основное накопительное кольцо), инженерные системы, экспериментальные станции и Лабораторный корпус. Описаны ключевые технические решения, положенные в основу магнитной структуры основного накопительного кольца, обеспечивающие достижение рекордно низкого эмиттанса 75 пм·рад. Для экспериментальных станций первой очереди представлены развернутые описания планируемой комплектации оборудования, реализуемых исследовательских методик и решаемых научных задач. По станциям второй очереди в более сжатом формате изложены основные идеи, лежащие в основе предлагаемых проектов.

Второй том содержит описание ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ». В первой статье представлены линейный ускоритель, бустерный синхротрон, предназначенный для ускорения пучка электронов из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ до проектной энергии основного кольца 3 ГэВ, и каналы транспортировки, которые служат для перевода электронных сгустков из одной установки в другую. Во второй статье приведены основные аспекты оптики и динамики пучка электронов в накопителе ЦКП «СКИФ». В последней статье описаны основные системы ЦКП «СКИФ»: магнитная система, вакуумная система, ускоряющие резонаторы, усилители мощности системы ВЧ питания резонаторов, источники питания магнитов, система управления ускорительным комплексом, система диагностики пучка и геодезическое обеспечение.

УДК 621.384.63:539.122(082)

ББК 22.38я4

ISBN 978-5-906376-42-8 (т. 2)

ISBN 978-5-906376-40-4

© Институт катализа СО РАН, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<a href="#">Статья 2-1</a> , Инжектор.....	4
<a href="#">Статья 2-2</a> , Динамика пучка в накопителе.....	98
<a href="#">Статья 2-3</a> , Основные системы накопителя.....	180

## Инжектор

А.В. Акимов<sup>1</sup>, Ю.С. Актершев<sup>1</sup>, В.В. Анашин<sup>1</sup>, А.В. Андрианов<sup>1</sup>, О.В. Анчугов<sup>1</sup>,  
М.В. Арсентьева, П.А. Бак<sup>1</sup>, Г.Н. Баранов<sup>1,2</sup>, А.М. Барняков<sup>1</sup>, А.М. Батраков<sup>1</sup>, О.В. Беликов<sup>1</sup>,  
Л.Л. Белова<sup>1</sup>, Е.А. Бехтенов<sup>1</sup>, В.И. Бухтияров<sup>3</sup>, А.В. Богомягков<sup>1,2</sup>, В.М. Борин<sup>1</sup>,  
Д.Б. Буренков<sup>1,2</sup>, Д.С. Винник<sup>1</sup>, В.Н. Волков<sup>1</sup>, Е.С. Вонда<sup>1</sup>, К.М. Горчаков<sup>1</sup>, К.А. Гришина<sup>1</sup>,  
Д.С. Гуров<sup>1</sup>, С.М. Гуров<sup>1</sup>, Г.А. Гусев<sup>1</sup>, Б.А. Довженко<sup>1</sup>, В.Л. Дорохов<sup>1,2</sup>, Е.Н. Дементьев<sup>1</sup>,  
А.И. Ерохин<sup>1</sup>, А.А. Жариков<sup>1</sup>, К.В. Жилиев<sup>1</sup>, А.А. Жуков<sup>1</sup>, А.Н. Журавлев<sup>1,2</sup>,  
К.В. Золотарев<sup>1,2</sup>, Н.А. Золотухина<sup>1</sup>, Я.В. Зубавичус<sup>2,3</sup>, С.Е. Карнаев<sup>1</sup>, Г.В. Карпов<sup>1</sup>,  
К.Ю. Карюкина<sup>1,2</sup>, В.Д. Кашкин<sup>1</sup>, В.А. Киселев<sup>1</sup>, В.В. Кобец<sup>1</sup>, Е.С. Котов<sup>1</sup>, В.Я. Корчагин<sup>1</sup>,  
А.А. Краснов<sup>1,2</sup>, В.С. Крапивин<sup>1</sup>, С.А. Крутихин<sup>1</sup>, В.С. Кузьминых<sup>1</sup>, Г.Н. Кулипанов<sup>1,2</sup>,  
И.В. Купцов<sup>1</sup>, Г.Я. Куркин<sup>1</sup>, А.Е. Левичев<sup>1,2</sup>, Е.Б. Левичев<sup>1,2</sup>, Д.В. Лешонок (Дорохова)<sup>1,2</sup>,  
П.В. Логачев<sup>1</sup>, Ю.И. Мальцева<sup>1</sup>, Ма Сяо Чао<sup>1</sup>, Н.А. Мезенцев<sup>1,2</sup>, О.И. Мешков<sup>1</sup>,  
Н.В. Митянина<sup>1</sup>, И.А. Морозов<sup>1,2</sup>, А.А. Морсин<sup>1</sup>, С.А. Никитин<sup>1</sup>, Д.А. Никифоров<sup>1</sup>,  
В.К. Овчар<sup>1</sup>, И.Н. Окунев<sup>1,2</sup>, А.В. Павленко<sup>1</sup>, О.А. Павлов<sup>1</sup>, А.Ю. Пахомов<sup>1</sup>, В.М. Петров<sup>1</sup>,  
С.Л. Пивоваров<sup>1</sup>, П.А. Пиминов<sup>1,2</sup>, А.В. Полянский<sup>1</sup>, Д.Н. Пурескин<sup>1</sup>, Д.Ф. Решетов<sup>1</sup>,  
В.В. Репков<sup>1</sup>, Е.А. Ротов<sup>1</sup>, Т.В. Рыбицкая<sup>1</sup>, С.Л. Самойлов<sup>1,2</sup>, И.К. Седяров<sup>1</sup>, А.М. Семенов<sup>1</sup>,  
Д.В. Сеньков<sup>1</sup>, Л.Е. Сердаков<sup>1</sup>, Ш.Р. Сигнатулин<sup>1</sup>, С.В. Синяткин<sup>1,2</sup>, М.А. Скамароха<sup>1,2</sup>,  
А.А. Старостенко<sup>1</sup>, А.Г. Трибендис<sup>1,2</sup>, А.В. Уткин<sup>1</sup>, М.Г. Федотов<sup>1</sup>, А.С. Цыганов<sup>1</sup>,  
А.Д. Чернякин<sup>1</sup>, И.Н. Чуркин<sup>1,2</sup>, С.В. Шиянков<sup>1</sup>, Д.А. Шведов<sup>1</sup>, В.А. Шкаруба<sup>1,2</sup>, К.С. Штро<sup>1</sup>,  
Н.С. Щегольков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, д. 11, 630090, г. Новосибирск

<sup>2</sup> ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, 630559, Кольцово

<sup>3</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090

Автор для переписки: [levichev@srf-skif.ru](mailto:levichev@srf-skif.ru)

**Аннотация.** Инжекция электронов в источник СИ СКИФ осуществляется на энергии эксперимента 3 ГэВ (*top-up injection*) с частотой, задаваемой требуемым током и временем жизни пучка в основном накопителе. Кроме технических параметров, выбор конфигурации инжекционного комплекса определяется возможностью максимально ускорить и упростить его изготовление путем использования оборудования, ранее производившегося в ИЯФ. Линейный ускоритель с энергией 200 МэВ аналогичен тому, который много лет работает в составе инжекционного комплекса ВЭПП-5 [1], бустерный синхротрон с максимальной энергией 3 ГэВ является модификацией синхротрона, разработанного ИЯФ для источника СИ NSLS II [2].

**Ключевые слова:** источник синхротронного излучения, линейный ускоритель, инжекция электронов, бустер, каналы транспортировки

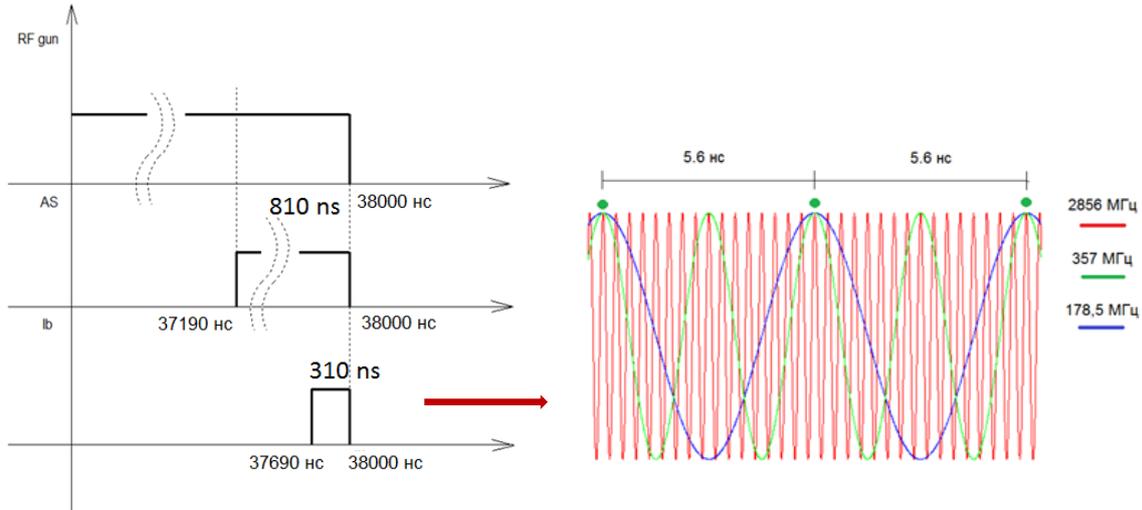
## Оглавление

1.1	Линейный ускоритель.....	6
1.1.1	Общее описание.....	6
1.1.2	Источник электронов.....	8
1.1.3	Система группировки и предускорения.....	10
1.1.4	Регулярная ускоряющая секция.....	14
1.1.5	Волноводная система.....	19
1.1.6	Клистрон.....	21
1.1.7	Магнитная система линака.....	23
1.1.8	Система диагностики пучка в линаке инжектора СКИФ.....	26
1.1.9	Требования к вакуумной системе.....	33
1.1.10	Система охлаждения и термостабилизации линака.....	34
1.1	Бустерный синхротрон.....	35
1.2.1.	Общее описание.....	35
1.2.2	Допуски на качество поля и точность позиционирования магнитов.....	38
1.2.3	Коррекция хроматизма.....	40
1.2.4	Вихревые токи в вакуумной камере.....	42
1.2.5	Коррекция замкнутой орбиты и оптики.....	44
1.2.6	Оценка эффективности инжекции в бустер.....	47
1.2.7	Магнитная система бустера.....	51
1.2.8	Вакуумная система бустера.....	54
1.2.9	Ускоряющая система бустера.....	57
1.2.10	Система питания магнитных элементов бустера.....	61
1.2.11	Система диагностики параметров пучка.....	62
1.2.12	Система управления и контроля.....	76
1.3	Каналы транспортировки.....	80
1.3.1	Транспортный канал ТК1 от линака до бустера.....	80
1.3.2	Транспортный канал ТК2 от синхротрона-бустера к накопителю.....	83
1.3.3	Инжекционные магниты-кикеры.....	90
	Список цитируемой литературы.....	94
	Приложение. Параметры каналов транспортировки пучка электронов СКИФ, соответствующие проектной настройке.....	96

## 1.1 Линейный ускоритель

### 1.1.1 Общее описание

В основном режиме работы источник СИ СКИФ заполняется приблизительно 500-ми сгустками электронов (частота ВЧ-резонаторов бустера и накопителя – 357 МГц) с полным током 400 мА. Частота повторения циклов инжекции 1 Гц. Для экспериментов с временным разрешением могут быть специальные режимы с одним или несколькими сгустками, распределенными требуемым образом вдоль орбиты.



**Рисунок 1.1.1.1.** Слева: импульс тока СВЧ пушки (RF gun), импульс тока максимальной длительности в регулярной ускоряющей структуре (AS), импульс тока в основном режиме (Ib). Справа: 2856 МГц – напряжение регулярной ускоряющей структуры, 357 МГц – напряжение резонатора накопителя, 178.5 МГц – напряжение СВЧ пушки. Зеленые точки обозначают электронные сгустки.

На **Рисунке 1.1.1.1** показана временная диаграмма СВЧ-импульсов и сгустков тока для основного режима. СВЧ-пушка работает на частоте 178.5 МГц, что является половиной частотой резонатора накопителя (бустера) и 1/16 частоты регулярной ускоряющей структуры 2856 МГц. Предполагается, что сгустки тока сначала заполняют каждую вторую сепаратрису накопителя, потом с помощью фазового смещения, заполняются оставшиеся. Длительность импульса СВЧ-пушки  $\geq 38000$  нс. Импульс клистронов регулярных ускоряющих структур  $\geq 810$  нс. Импульс впускного магнита-кикера в бустерном синхротроне  $\approx 310$  нс позволяет инжектировать максимум 55 сгустков СВЧ-пушки (частота 178.5 нс, период 5.6 нс) – именно эта длительность и определяет огибающую тока пучка в ускоряющей структуре линака.

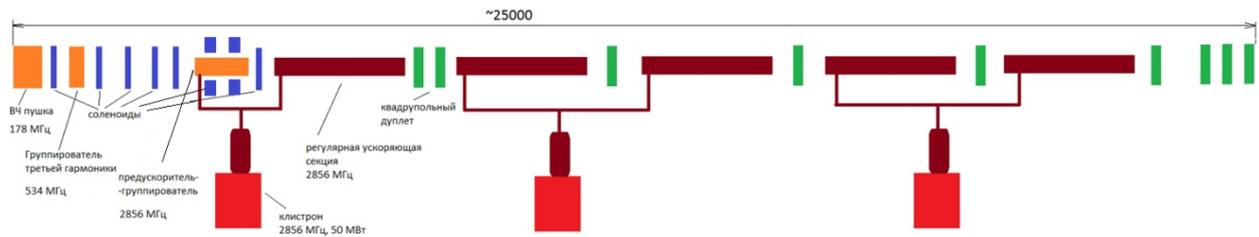
Для основного режима накопителя инжекция осуществляется цугами по 55 сгустков с зарядом  $\approx 0.3$  нКл в каждом, для специальных режимов управление модулятором пушки позволяет получить в цуге один или несколько (в пределах огибающей 310 нс) сгустков. В последнем случае для уменьшения времени заполнения кольца интенсивность сгустка может быть увеличена до  $\approx 1$  нКл.

Параметры линейного ускорителя приведены в **Таблице 1.1.1.1**.

**Таблица 1.1.1.1.** Параметры линейного ускорителя инжектора СКИФ.

Энергия электронов	200 МэВ
Максимальная энергия	210 МэВ
Частота выстрелов	1 Гц
Геометр.эмиттанс на 200 МэВ	150 нм
Разброс по энергии на 200 МэВ	$\leq 1\%$ (rms)

Линак состоит из трех основных частей (**Рисунок 1.1.1.2**): источника электронов, системы группировки и предускорения и регулярных ускоряющих структур. В каждой части имеются элементы, обеспечивающие фокусировку и диагностику пучка, необходимые вакуумные условия и т.п.

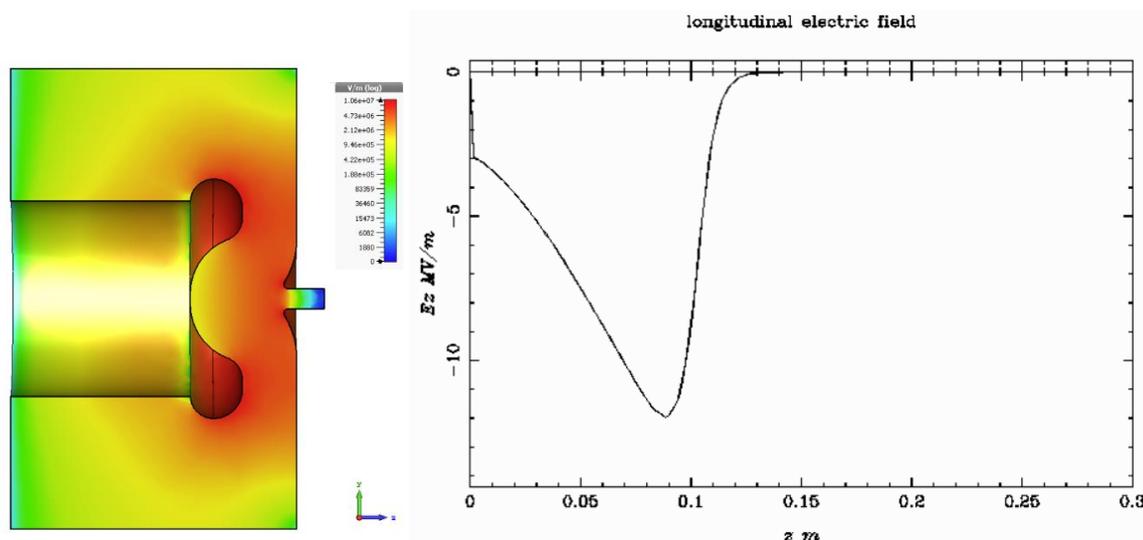
**Рисунок 1.1.1.2.** Схематичный вид линейного ускорителя инжектора СКИФ.

К основным компонентам линейного ускорителя относятся:

- Источник электронов – СВЧ пушка с рабочей частотой 178.5 МГц.
- Резонатор группировки пучка с частотой 535.5 МГц (третья гармоника рабочей частоты СВЧ пушки). Мы будем обозначать резонатор РГЗ.
- Предускоритель-группирователь (ПГ), представляющий собой структуру на бегущей волне ( $2\pi/3$ ) с частотой 2856 МГц.
- Основная ускоряющая структура (УС, 5 секций длиной 3 м каждая) на бегущей волне ( $2\pi/3$ ) с частотой 2856 МГц.
- Источник СВЧ питания пушки с выходной мощностью примерно 1 МВт, длительностью импульса до 100 мкс и частотой повторения 20 Гц. Модулятор источника СВЧ должен генерировать импульсы напряжения до 150 В с длительностью 2 нс.
- СВЧ питание резонатора группировки пучка (РГЗ) на частоту  $\approx 535.5$  МГц мощностью 10 кВт с длительностью импульса до 100 мкс и частотой повторения 20 Гц.
- Три клистрона, питающие ПГ и пять секций основной УС (см. **Рисунок 1.1.1.1**). Параметры клистрона – частота 2856 МГц, номинальная мощность 50 МВт длительностью импульса до 4 мкс и частотой повторения до 20 Гц. Модулятор клистрона должен обеспечить напряжение 350 кВ в импульсе  $\approx 7$  мкс с импульсной мощностью около 120 МВт.
- Для достижения требуемой надежности работы линака, ускоряющая структура должна быть термостатирована в диапазоне  $\Delta T \sim \pm 0.1^\circ$ , для чего предусмотрена система термостатирования на основе нагревателя мощностью 4 кВт.

### 1.1.2 Источник электронов

Источником электронов служит СВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, управляемая катодно-сеточным узлом. Предполагается использовать диспенсерный или оксидный катод СВЧ триода (например, ГС-34 [3]). Система позволяет не только получать необходимый заряд, но и управлять им, запирая эмиссию электронов напряжением в зазоре катод-сетка с помощью отдельного модулятора. Конфигурация резонатора пушки и распределение электрического поля на оси показаны на **Рисунке 1.1.2.1**. Основные расчетные параметры приведены в **Таблице 1.1.2.1**.



**Рисунок 1.1.2.1.** Конфигурация резонатора пушки и распределение ускоряющего поля на оси.

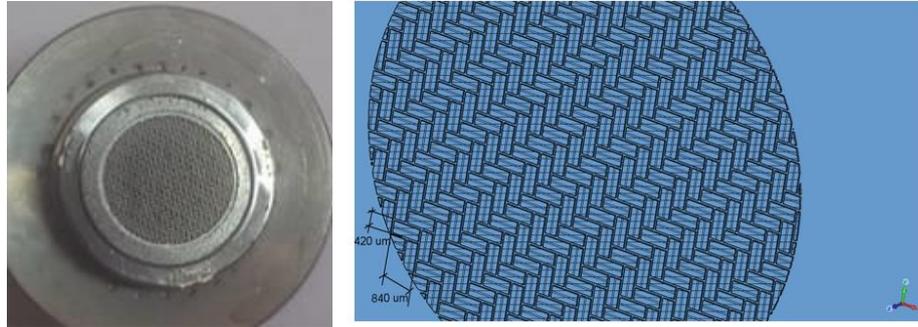
**Таблица 1.1.2.1.** Параметры резонатора СВЧ пушки.

Резонансная частота, МГц	178.5
Максимальное поле на оси, МВ/м	13
Кэфф. перенапряженности	1.8
Добротность	10300
Импульсная мощность, кВт	500

**Таблица 1.1.2.2.** Основные параметры катодно-сеточного узла СВЧ триода ГС-34.

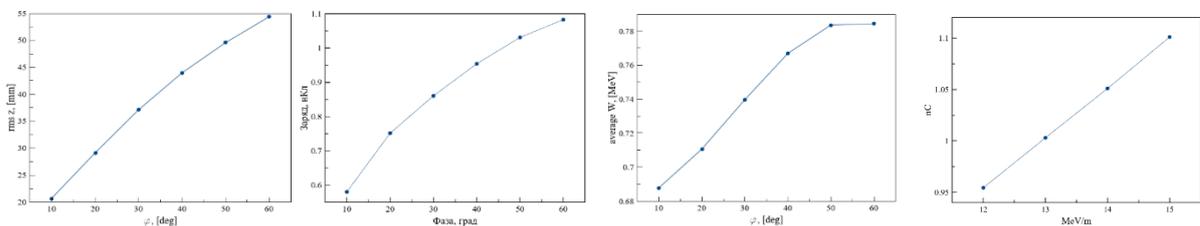
Мощность, рассеиваемая сеткой, Вт	3
Напряжение накала, В	12÷13.2
Напряжение смещения, В	-150÷0
Максимальный импульсный ток катода, А	11
Импульсный ток сетки, А	4
Длительность импульса, мс	10
Прозрачность сетки	75%
Кэфф. проникновения электрического поля	26%

За основу катодно-сеточного узла взят узел от СВЧ триода ГС-34 (**Рисунок 1.1.2.2**). Его параметры приведены в **Таблице 1.1.2.2**. Катодно-сеточный узел обладает паркетной сеткой с коэффициентом прозрачности 75%.



**Рисунок 1.1.2.2.** Внешний вид катодно-сеточного узла СВЧ триода ГС-34 (слева). Модель узла для расчетов (справа).

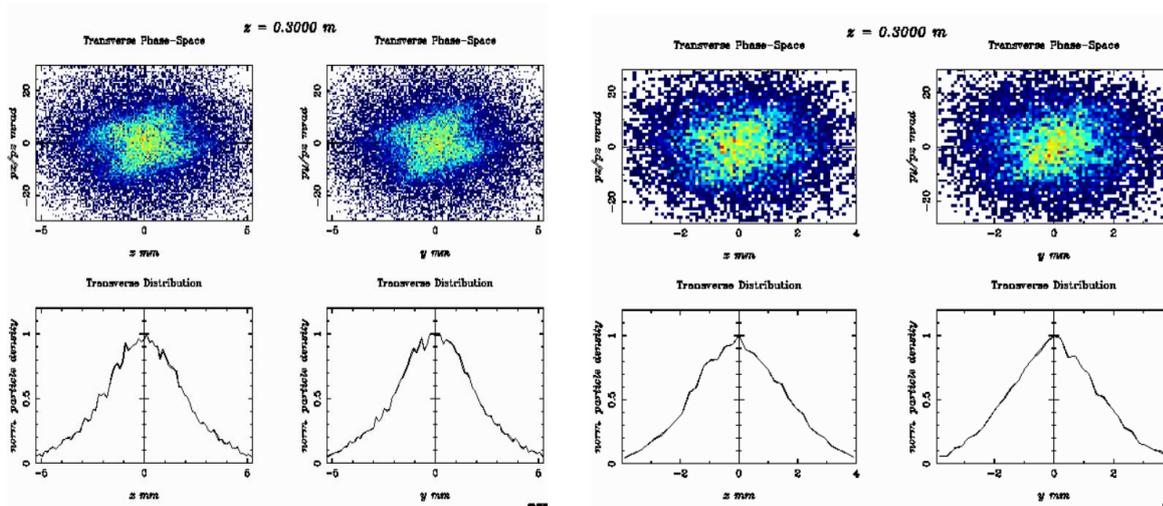
Было проведено моделирование зазора катод-сетка с реальной паркетной сеткой, показанной на правом **Рисунке 1.1.2.2**. Полученная проницаемость для переменного электрического поля СВЧ пушки на частоте 178.5 МГц составляет около 26%. С учетом этого для напряжения смещения до 25 В и управляющего напряжения модулятора до –100 В было проведено моделирование параметров пучка с помощью кода ASTRA [4]. Результаты приведены на **Рисунке 1.1.2.3**.



**Рисунок 1.1.2.3.** Расчетные параметры пучка на выходе СВЧ пушки при фиксированной амплитуде напряженности поля 13 МВ/м в зависимости от фазы, слева-направо: (1) среднеквадратичная длина пучка, (2) извлекаемый заряд, (3) средняя энергия; (4) зависимость выходного заряда от ускоряющего поля СВЧ пушки при фиксированной фазе 40° инжекции.

Из графиков видно, что средняя энергия пучка из пушки около 0.7÷0.8 МэВ. Извлекаемый заряд близок к 1 нКл при фазах инжекции 40÷50° и напряженности поля 13 МВ/м. При увеличении фазы инжекции возрастает не только заряд извлекаемого пучка, но и его продольный размер, что сказывается на степени группировки пучка и результирующем энергетическом разбросе. Поднять заряд при фиксированной фазе можно увеличив амплитуду ускоряющего поля (четвертый график на **Рисунке 1.1.2.3**). С учетом коэффициента перенапряженности 1.8 увеличение амплитуды поля до 15 МВ/м не выглядит проблематичным с точки зрения СВЧ пробоев. Для заряда 0.3 нКл, характерного для основного режима инжектора, никаких ограничений при моделировании не обнаружено.

На **Рисунке 1.1.2.4** показаны примеры поперечных фазовых портретов сгустков с зарядами 1 нКл и 0.3 нКл соответственно на выходе СВЧ пушки, полученные с помощью кода ASTRA [4].



**Рисунок 1.1.2.4.** Поперечные фазовые профили пучка с зарядом сгустка 1 нКл (слева) и 0.3 нКл (справа).

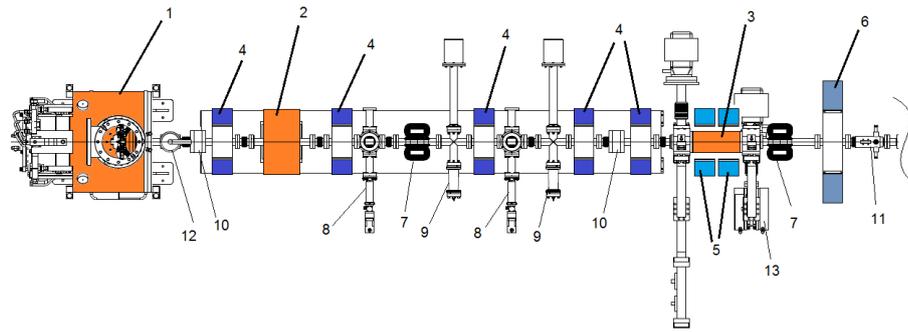
### 1.1.3 Система группировки и предускорения

Схема системы группировки и ее состав представлены на **Рисунке 1.1.3.1**. Пучок из СВЧ пушки эмитируется уже в группирующей фазе. Для линейаризации группирующих сил дополнительно используется РГЗ с частотой 535.5 МГц. Регулярные УС линейного ускорителя предназначены для работы с релятивистским пучком. Такой пучок формируется в ПГ, который служит для окончательной группировки и ускорения пучка до энергии около 3 МэВ.

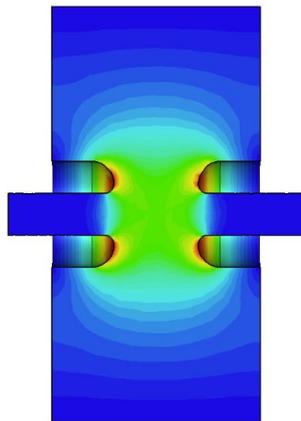
В систему группировки входит также фокусирующие соленоиды и оборудование диагностики пучка.

РГЗ с частотой 535.5 МГц и таблица с его параметрами показаны на **Рисунке 1.1.3.2** и в **Таблице 1.1.3.1**.

ПГ является частью регулярной ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода с частотой 2856 МГц и видом колебания  $2\pi/3$ , которые используются на инжекционном комплексе ВЭПП-5 ИЯФ [5], ее конфигурация показана на **Рисунке 1.1.3.3**. Структура состоит из девяти регулярных ускоряющих ячеек и двух трансформаторов типа волны. Параметры структуры приведены в **Таблице 1.1.3.1**. Благодаря энергии пучка на выходе СВЧ пушки 0.7 МэВ, нет необходимости в оптимизации размеров первых ускоряющих ячеек. При выборе необходимой фазы инжекции пучка в структуру ПГ можно добиться дополнительной продольной группировки пучка и его ускорения до релятивистских значений энергии.

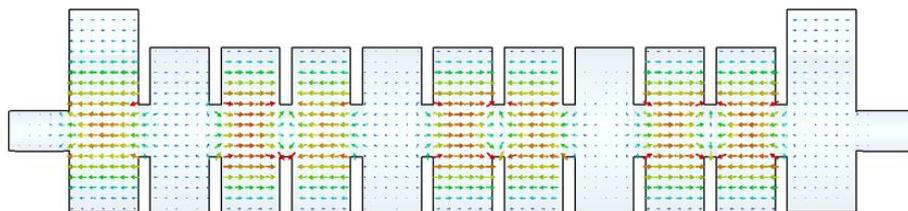


**Рисунок 1.1.3.1.** Схема системы группировки. Обозначения: 1 – СВЧ пушка с частотой 178.5 МГц, 2 – РГЗ с частотой 535.5 МГц, 3 – ПГ с частотой 2856 МГц, 4 – соленоиды дрейфового промежутка (5 шт.), 5 – соленоиды ПГ (2 шт.), 6 – согласующий соленоид, 7 – корректоры траектории пучка (2 шт.), 8 – измерители длительности пучка (2 шт.), 9 – люминофор (2 шт.), 10 – датчики тока пучка (2 шт.), 11 – пикап станция, 12 – автоматический вакуумный шибер, 13 – волноводная СВЧ- нагрузка.



Характеристика	Обозначение	Значение
Резонансная частота	$f_3, \text{MHz}$	535.3-535.5
Добротность (80% от расчета SLANS)	$Q_3$	20210
Эффективн. Характеристич. импеданс	$\rho_3, \text{Ohm}$	148.2
Коэффициент пролета	$T$	0.9614564
Накопленная ВЧ энергия	$U_3, \text{Дж}$	0.036267
Эффективное напряжение ( $\rho \cdot Q$ )	$V_3, \text{MV}$	0.19
Мощность имп., рассеив-ая в стенках	$P_3, \text{kWt}$	6.02
Средняя мощность, рассеив. в стенках	$Bm$	<1.5
Энергия пучка на выходе резонатора	$E_3, \text{MeV}$	0.5112
Энергия пучка на входе резонатора	$\text{MeV}$	0.684
Фаза пролета относит. фазы ВЧ	$\Phi_3, \text{град}$	-188.01
Подсадка напряжения рез-ра пучком	$\Delta V_3/V_3, \%$	0.237948
Стабильность амплитуды ВЧ	$\%$	<4.7
Стабильность фазы ВЧ	$\text{град}$	<3.0
г.т.с. поперечный размер пучка	$\text{мм}$	2.7
Чувствительность к прогибу стенки	$\text{МГц/мм}$	1.73
Чувствительность к измен. длины рез.	$\text{МГц/мм}$	0.95
Ход пьезокерамическ. Тюнера 40 мм	$\text{мкм}$	38
Ход Тюнера под нагрузкой 65 kN/mm	$\text{мкм}$	23

**Рисунок 1.1.3.2.** Вид группирователя 3-й гармоники и его параметры.



**Рисунок 1.1.3.3.** Структура предускорителя – группирователя ПГ.

**Таблица 1.1.3.1.** Параметры структуры ПГ.

Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1.32 \cdot 10^4$
Групповая скорость	0.021с
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Коэффициент затухания в УС по полю	0.108 1/м
Период	34.98 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.8 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм
Коэффициент перенапряжения	1.7
Время заполнения структуры	56 нс

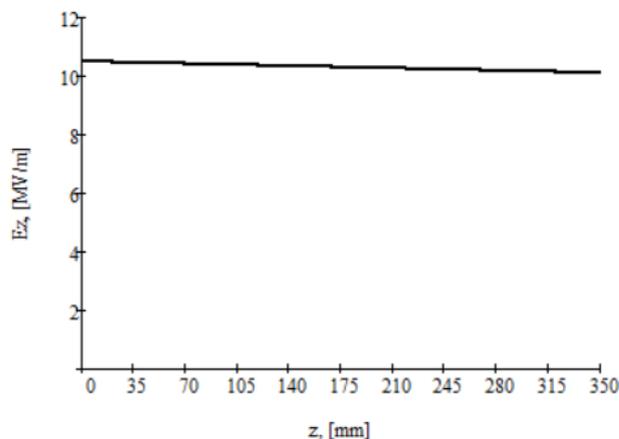
Ответвляемая СВЧ мощность в данную структуру составляет около 10 МВт. С учетом параметров, приведенных в **Таблице 1.1.3.1**, воспользовавшись выражением для распределения поля вдоль ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода с постоянным импедансом [6],

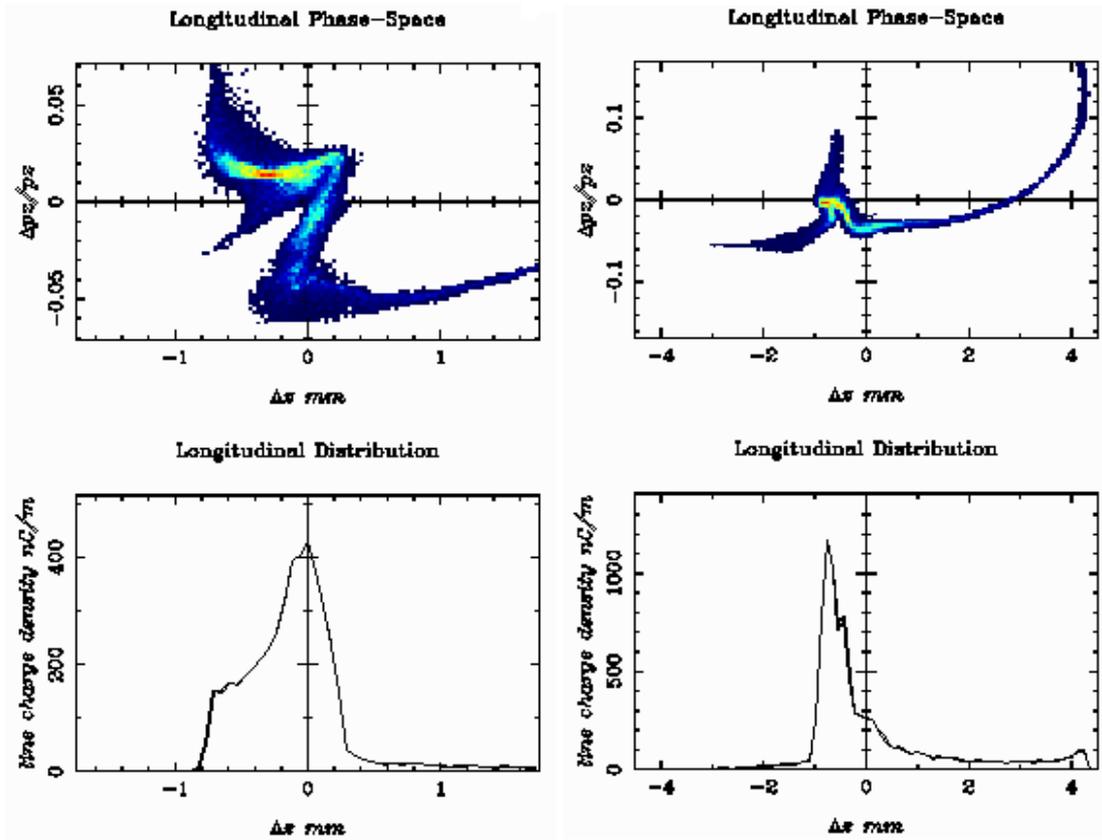
$$E(z, t) = E_0 \left( t - \frac{z}{v_{gr}} \right) \exp(-\alpha z), \quad (1.1.3.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания по полю,  $R_{sh}$  – шунтовое сопротивление структуры,  $v_{gr}$  – групповая скорость, а амплитуда поля на входе в структуру при постоянной входной мощности  $P_0 = const$  равна

$$E_0 = E(0, t) = \sqrt{2\alpha R_{sh} P_0},$$

с учетом параметров **Таблицы 1.1.3.1**, можно получить распределение ускоряющего поля, показанное на **Рисунке 1.1.3.4**. В этом случае, максимальная энергия составит 3.6 МэВ.

**Рисунок 1.1.3.4.** Распределение электрического поля вдоль структуры ПГ при входной мощности 10 МВт.



**Рисунок 1.1.3.5.** Продольные распределения частиц на выходе системы группировки и предускорения: слева – заряд сгустка 0.3 нКл (средняя энергия = 2.74 МэВ,  $\sigma_z = 0.7$  мм), справа – 1 нКл (средняя энергия = 3 МэВ,  $\sigma_z = 1.8$  мм).

При дрейфовом промежутке между РГЗ и ПГ около 1.7 м продольные распределения пучка показаны на **Рисунке 1.1.3.5**. Все расчеты проведены с помощью программы моделирования динамики пучка ASTRA в электромагнитных полях.

Для распределения полей вдоль системы группировки и предускорения пучка, показанного на **Рисунке 1.1.3.6**, среднеквадратичный поперечный размер пучка (радиус) приведен на **Рисунке 1.1.3.7**. Магнитное поле для двух зарядов в сгустке 0.3 нКл и 1 нКл одно и то же. Для расчетов задавалось ограничение апертуры 24 мм, задаваемое отверстием диафрагмы структуры ПГ. Как показало моделирование программой ASTRA, коэффициент прохождения частиц равен 100%, максимальный размер пучка не превышает 20 мм.

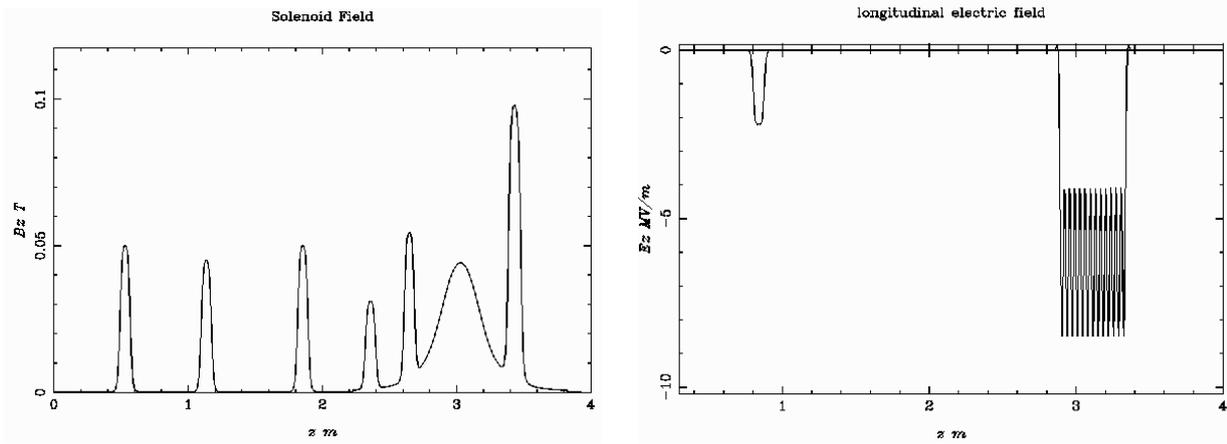


Рисунок 1.1.3.6. Распределения магнитного (слева) и электрического (справа) полей системы группировки и предускорения пучка.

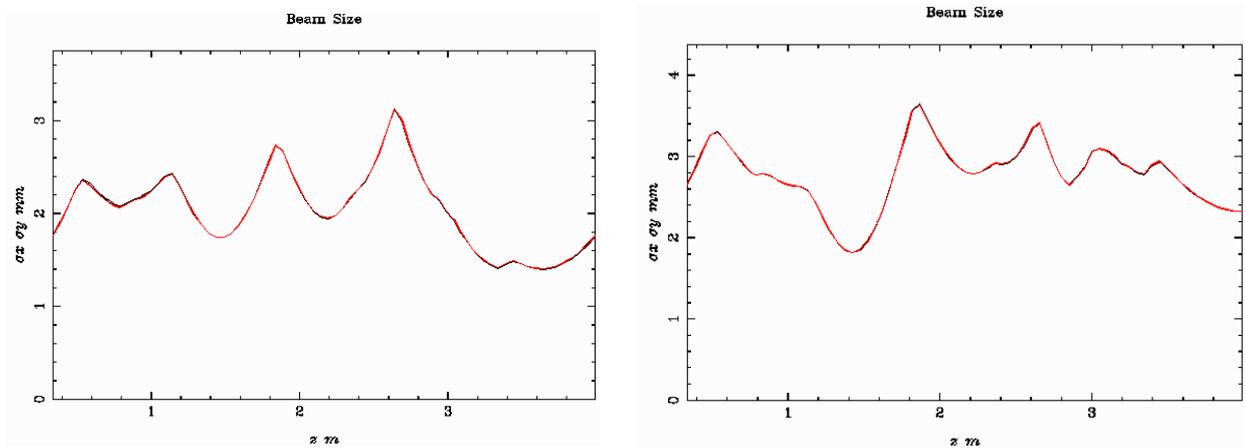


Рисунок 1.1.3.7. Поперечное среднеквадратичное отклонение пучка в системе группировки и предускорения: слева – для заряда 0.3 нКл, справа – для заряда 1 нКл.

### 1.1.4 Регулярная ускоряющая секция

Схема основной ускоряющей секции линейного ускорителя представлена на **Рисунке 1.1.4.1**. Она состоит из пяти регулярных ускоряющих структур (УС) с частотой 2856 МГц, длиной 3 м каждая и с видом колебания  $2\pi/3$  (обозначены 1 на **Рисунке 1.1.4.1**), вводов СВЧ мощности (обозначение - 2), пяти волноводных СВЧ нагрузок (обозначены – 3).

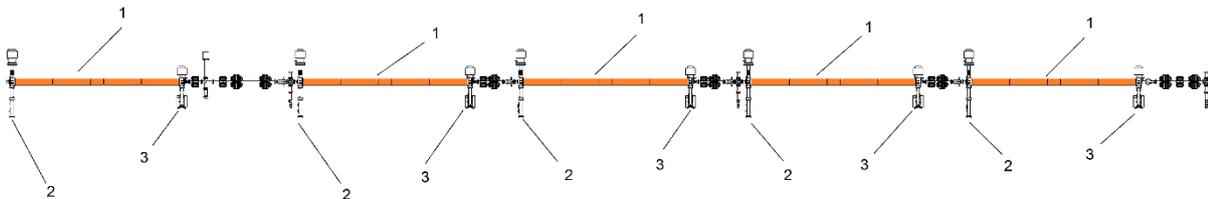
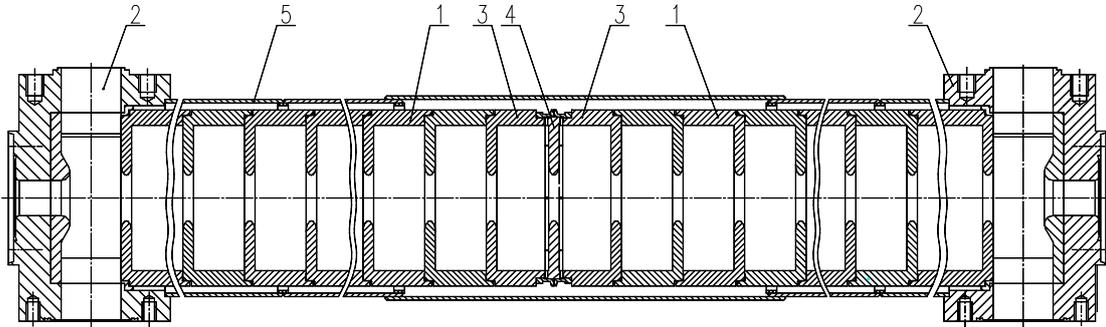


Рисунок 1.1.4.1. Регулярные секции ускорения пучка: 1 – ускоряющие структуры, 2 – ввод СВЧ мощности, 3 – волноводные СВЧ нагрузки.

Регулярные УС (Рисунок 1.1.4.2, параметры в Таблице 1.1.4.1) выполнены на основе диафрагмированного волновода с постоянным импедансом с модой колебания  $2\pi/3$ ; они давно и успешно используются в ИЯФ СО РАН на инжекционном комплексе ВЭПП-5.



**Рисунок 1.1.4.2.** УС типа диафрагмированный волновод: 1 – регулярная ускоряющая ячейка, 2 – трансформатор типа волны, 3–переходная (соединительная) ускоряющая ячейка, 4 – соединительная диафрагма, 5 – рубашка охлаждения.

УС запитываются тремя клистроном с импульсной мощностью 50 МВт. Первый клистрон питает ПГ и первую регулярную УС с соотношением мощностей 10 МВт и 40 МВт соответственно. В оставшиеся 4 регулярные УС должно поступать по 25 МВт от двух клистронов. Распределение электрического поля вдоль УС показано на Рисунке 1.1.4.3. Максимальная набираемая энергия в первой УС 53 МэВ, для последующих – 42 МэВ. Суммарная максимальная энергия пучка составляет 221 МэВ.

**Таблица 1.1.4.1.** Параметры регулярной УС.

Рабочая частота	2856 МГц
Рабочий вид колебаний	$2\pi/3$
Собственная добротность	$1.3 \cdot 10^4$
Период	34.99 мм
Внутренний диаметр резонатора	83.75 мм
Диаметр отверстия диафрагмы	25.9 мм
Толщина диафрагмы	6 мм
Длина	2.93 м
Фазовая скорость	$1c$
Групповая скорость	$0.021c$
Шунтовое сопротивление	51 МОм/м
Коэффициент затухания по полю	$0.108 \text{ м}^{-1}$
Время заполнения структуры	0.456 мкс

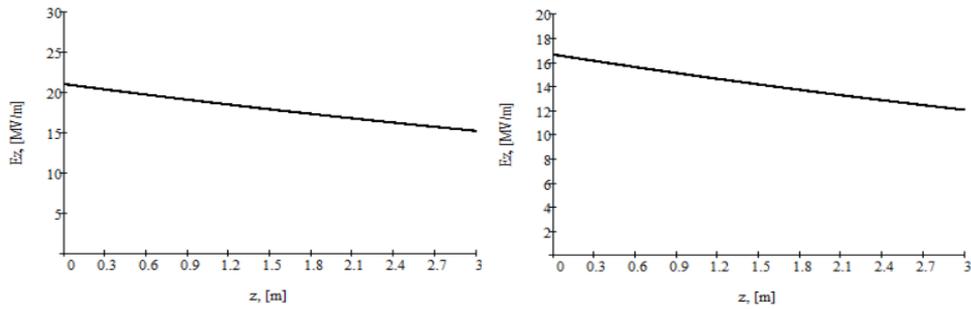


Рисунок 1.1.4.3. Распределения электрического поля вдоль УС: слева – входная мощность 40 МВт, справа – входная мощность 25 МВт.

На Рисунке 1.1.4.4 показаны результаты моделирования продольного фазового движения частиц. Основные полученные с помощью моделирования параметры пучка приведены в Таблице 1.1.4.2, из которой видно, что полученные параметры удовлетворяют требованиям технического задания.

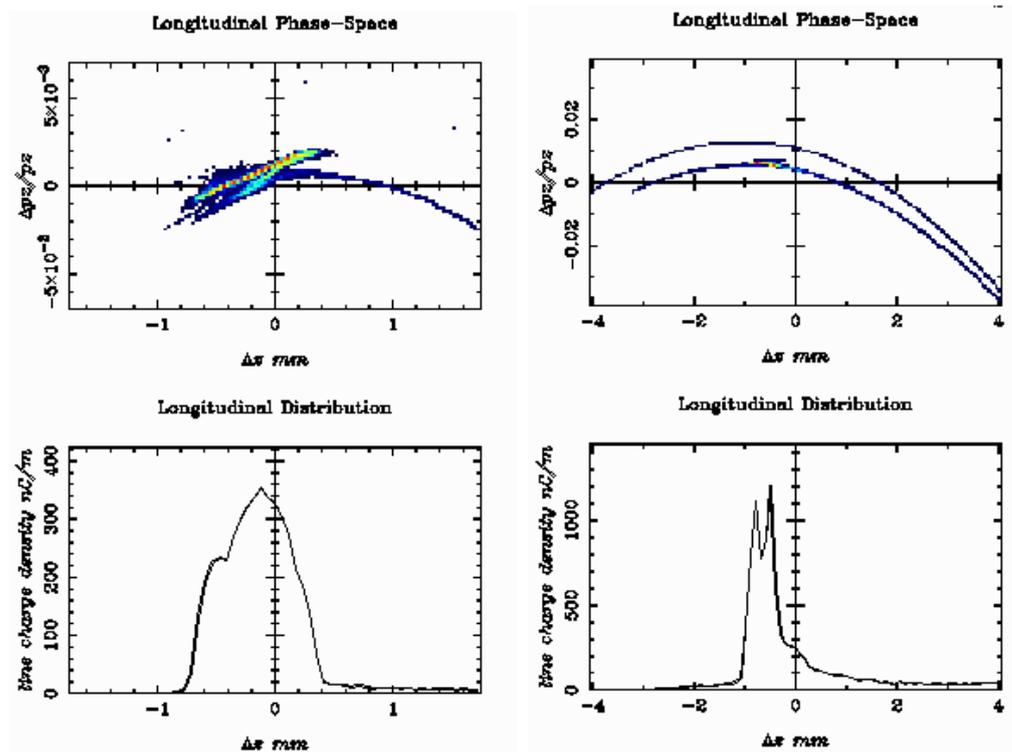
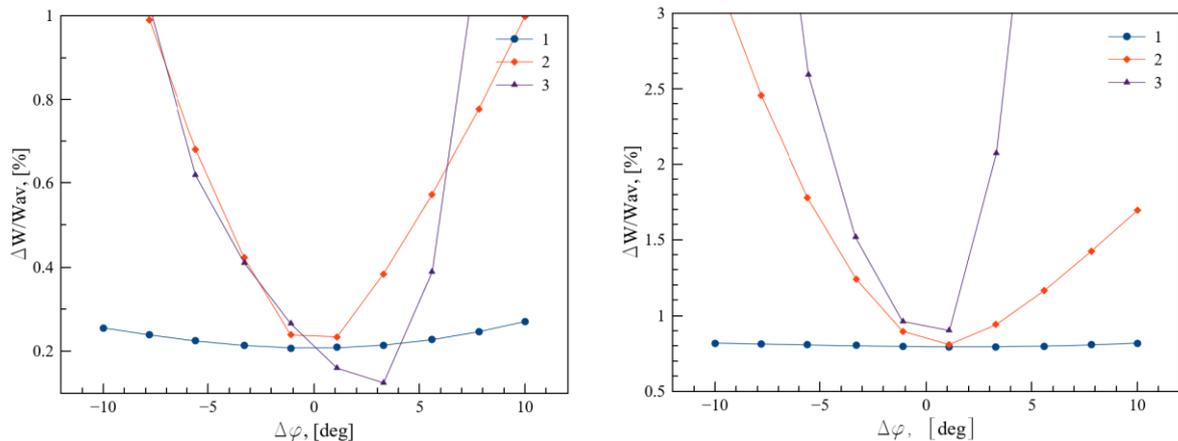


Рисунок 1.1.4.4. Продольная фазовая плоскость частиц на выходе линейного ускорителя инжектора СКИФ: слева – для заряда 0.3 нКл, справа – для заряда 1 нКл.

**Таблица 1.1.4.2.** Параметры пучка на выходе линейного ускорителя.

Заряд, нКл	0.3	1
Средняя энергия, МэВ	200	200
Разброс (rms) энергии в сгустке, МэВ	0.54 (0.27%)	1.59 (0.79%)
Нормализованный верт.эмиттанс, п мм мрад	18.3	35.3
Нормализованный гориз.эмиттанс, п мм мрад	18.4	34.8

Для определения требований на стабильность фаз элементов систем группировки, предускорения и первой регулярной УС, было рассчитано изменение энергетического разброса пучка в зависимости от отклонения фазы. Результаты приведены на **Рисунке 1.1.4.5**.



**Рисунок 1.1.4.5.** Изменение энергетического разброса пучка в зависимости от фазовых отклонений для заряда 0.3 нКл (слева) и 1 нКл (справа). Обозначения графиков: 1 – первая регулярная УС, 2 – ПГ, 3 – РГЗ.

Графики показывают, что для заряда 0.3 нКл точность фазировки в первой регулярной ускоряющей структуре невысока и может достигать  $\approx 20^\circ$ ; для ПГ и РГЗ допустима точность  $\approx 10^\circ$ . Для заряда 1 нКл требования на фазовую стабильность жестче:  $\leq 10^\circ$  для первой регулярной структуры и  $\approx 4 \div 5^\circ$  для ПГ и РГЗ. Допустимый временной разброс (jitter) приведен в **Таблице 1.1.4.3**. Абсолютная фаза РГЗ будет стабилизироваться генератором и термостатированием, а для структур с частотой 2856 МГц – волноводными механическими фазовращателями и так же термостатированием.

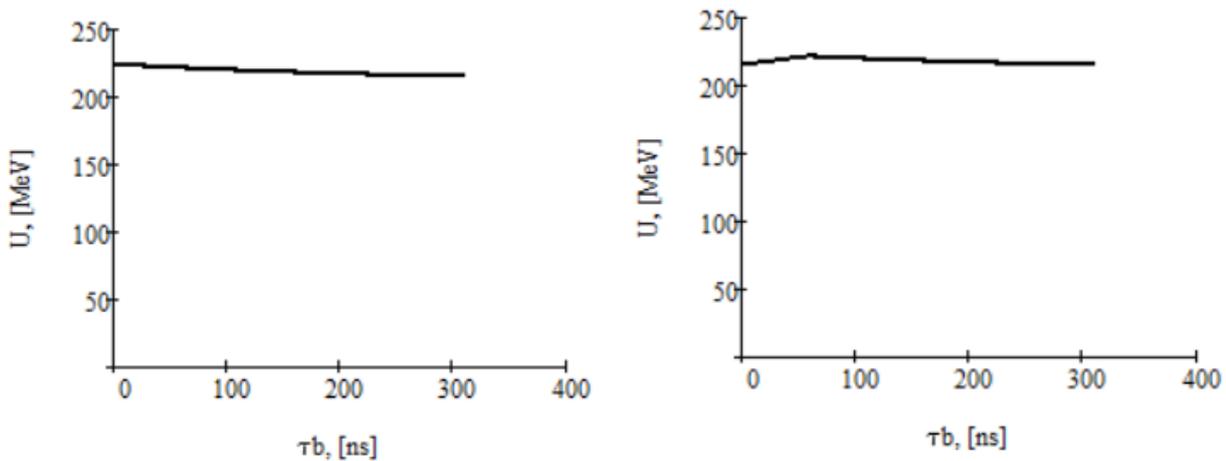
**Таблица 1.1.4.3.** Допуски на временную и фазовую стабильность.

Заряд, нКл	0.3	1
Для РГЗ, пс	51	21
Для структуры ПГ, пс	9.7	4.5
Для регулярных УС, пс	19	9.7
Минимальная величина фазовой стабильности	4.5°	

ASTRA не позволяет учесть нагрузку пучком ускоряющего поля, поэтому оценим этот эффект аналитически. Выражение для набора потенциала пучком с учетом тока  $I_0$  для ускоряющей структуры на основе диафрагмированного волновода с постоянным импедансом [6] (обозначения объяснены выше):

$$U(z) + U_b(z) = [E_0 + I_0 R_{sh}] \cdot \frac{1 - \exp(-\alpha \cdot z)}{\alpha} - I_0 R_{sh} z. \quad (1.1.4.1)$$

С учетом модельных распределений частиц можно считать, что для последовательности сгустков электронов с зарядом 0.3 нКл в каждом, частотой следования 178.5 МГц и полной длительностью 320 нс, средний ток составит  $I_0 = 90$  мА. Распределение набираемой энергии в зависимости от длительности пучка, полученное на основе (1.1.4.1), приведено на **Рисунке 1.1.4.6**. В этом случае энергетический разброс между началом пучка и его концом составляет около 4%. Для частичной компенсации этого разброса можно инжектировать пучок в один из ускоряющих модулей на 58 нс раньше времени полного заполнения ускоряющей структуры, которое составляет 456 нс. В этом случае разброс между максимальной и минимальной энергиями в пучке можно сократить до 3%.



**Рисунок 1.1.4.6.** Распределение набираемой энергии в зависимости от длительности пучка со средним током 90 мА (слева). Распределение набираемой энергии в зависимости от длительности пучка со средним током 90 мА при задержке времени влета на 58 нс (справа).

Итоговые параметры пучка на выходе линейного ускорителя приведены в **Таблице 1.1.4.4**.

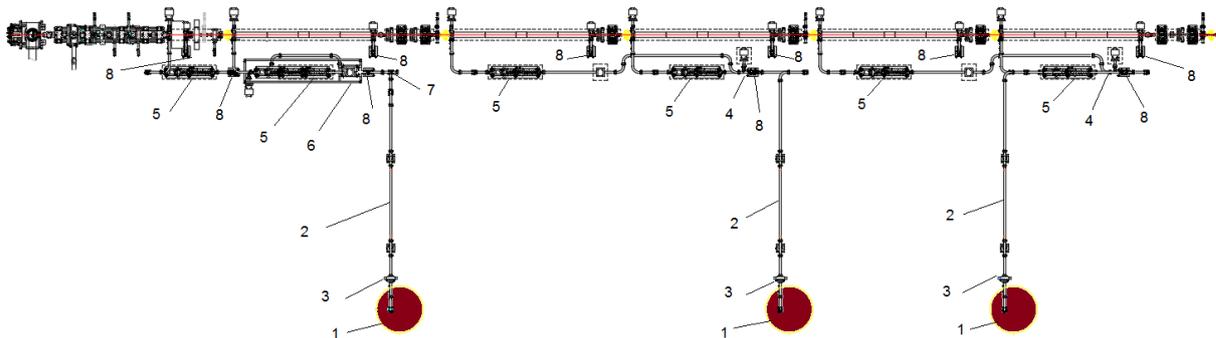
**Таблица 1.1.4.4.** Параметры пучка на выходе линейного ускорителя.

Заряд, нКл	0.3	1
Токопрохождение, %	100	100
Средняя энергия, МэВ	200	200
Отклонение энергии (rms) в сгустке, МэВ	0.54 (0.27%)	1.59 (0.79%)
Энерг.разброс из-за нагрузки током пучка, %	3÷4	-
Нормализованный верт.эмиттанс, π мм мрад	18.3	34.3
Нормализованный гор.эмиттанс, π мм мрад	18.4	33.8

### 1.1.5 Волноводная система

Для передачи СВЧ мощности от клистронов (50 МВт) к нагрузкам планируется использовать волноводы с внутренним поперечным сечением  $72 \times 34 \text{ мм}^2$  с водяной термостабилизацией. Схема волноводного тракта приведена на **Рисунке 1.1.5.1**. Первый клистрон питает первую регулярную УС и ПГ, куда с помощью волноводного ответвителя 7 на 7 дБ поступает 10 МВт. Соответственно, в первую регулярную УС поступает 40 МВт. Для возможности более тонкой настройки мощности, которая поступает в ПГ планируется использовать волноводный аттенуатор 6. Для остальных УС мощность от клистронов делится пополам с помощью 3-х дБ-ых мостов 4 и составляет 25 МВт. Каждая из регулярных ускоряющих структур, а также предускоритель-группирователь имеют на входе волноводные фазовращатели 5. Для возможности монтажа клистронов 1 без нарушения вакуума всего линейного ускорителя предусмотрены волноводные вакуумные шиберы 3. Прощедшая и отраженная СВЧ мощности поглощаются в нагрузках 8. Список волноводных элементов приведен в **Таблице 1.1.5.1**.

Вид семи дБ-го волноводного ответвителя показан на **Рисунке 1.1.5.2**. В верхнее плечо 1 поступает 50 МВт, в плечо 2 поступает 40 МВт, в плечо 3 — 10 МВт. Коэффициент ответвления может настраиваться с помощью короткозамыкающего плунжера 4.



**Рисунок 1.1.5.1.** Схема волноводного тракта: 1- клистрон, 2 – волноводы, 3- вакуумный волноводный шибер, 4 – 3-х дБ-ый мост, 5 – волноводный фазовращатель, 6 – волноводный аттенуатор (включает 2 3-х дБ-ых моста и 1 фазовращатель), 7 – 7-ми дБ-ый волноводный ответвитель, 8 – волноводная СВЧ нагрузка.

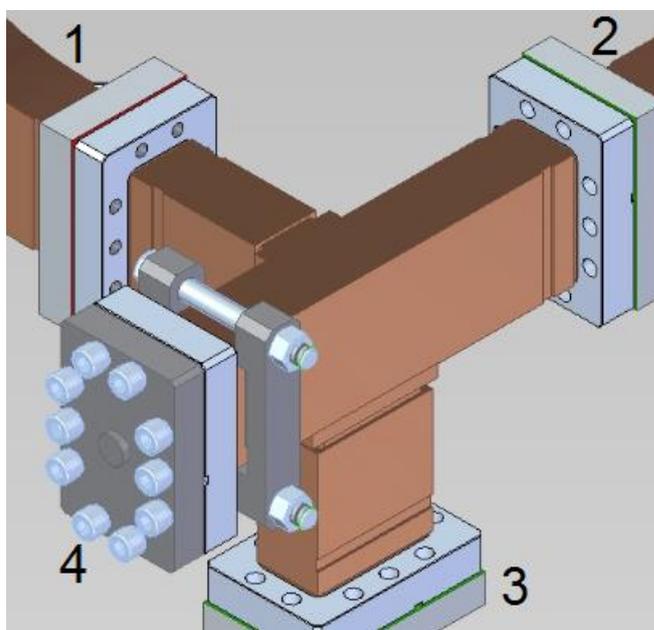
Волноводный фазовращатель (**Рисунок 1.1.5.2**) представляет собой часть гладкого волновода, широкая стенка которого может деформироваться с помощью электропривода. Изменение длины волны в волноводе  $\Lambda$  приводит к изменению фазы согласно:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\Lambda} z,$$

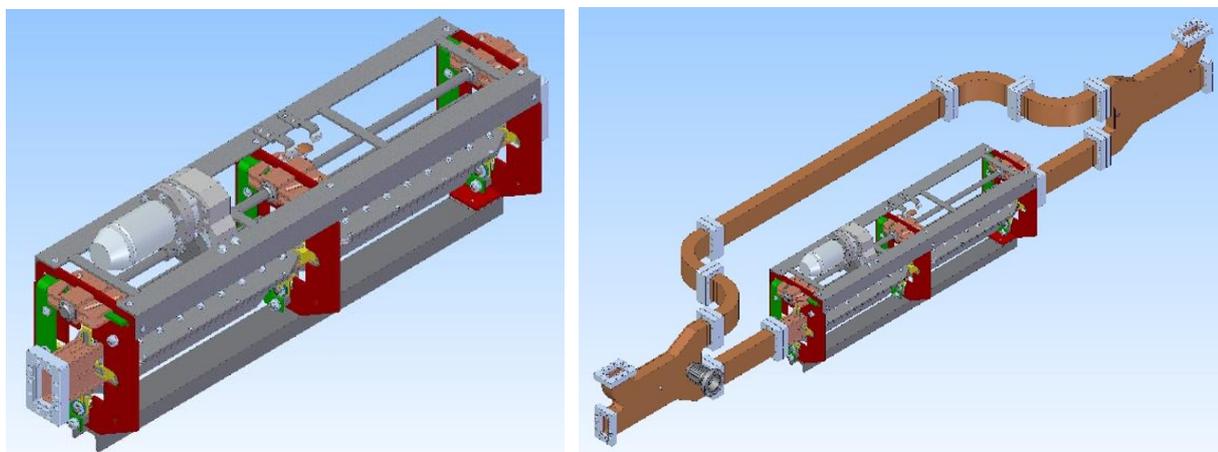
где  $z$  – расстояние вдоль волновода.

**Таблица 1.1.5.1.** Список волноводных элементов.

Элемент	Кол-во	Функция
Волноводные фазовращатели (включая фазовращатель для аттенюатора)	7	Подбор фазы ускоряющего поля
Вакуумные волноводные шиберы	3	Разделение вакуумного и невакуумного объемов в случае необходимости
7-ми дБ-ый ответвитель	1	Ответвление СВЧ мощности в предускоритель-группирователь
3-х дБ-ый волноводный мост (включая мост для аттенюатора)	4	Разделение СВЧ мощности пополам
Волноводные СВЧ нагрузки	10	Поглощение СВЧ мощности



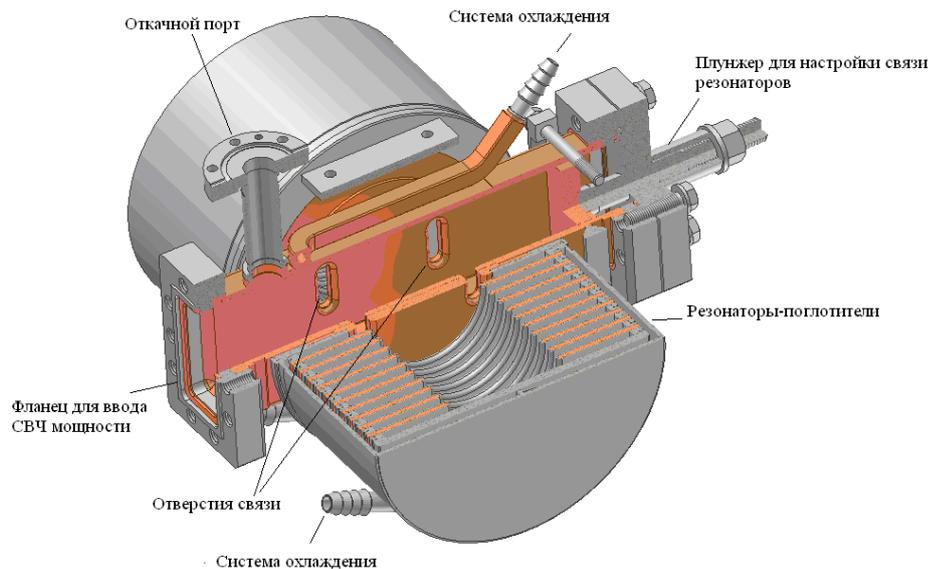
**Рисунок 1.1.5.2.** Схема волноводного 7 дБ-ого ответвителя.



**Рисунок 1.1.5.3.** Волноводные фазовращатель (слева) и аттенюатор (справа).

Волноводный аттенюатор (**Рисунок 1.1.5.3**) является сборкой из двух трех-децибельных щелевых мостов и волноводного фазовращателя между ними. Принцип его работы основан на свойствах щелевого моста, в котором мощность, поступающая от генератора, делится поровну между противоположными каналами со сдвигом фазы  $\pi/2$  [7]. При этом в четвертое плечо ничего не поступает. Также работает зеркальное отображение: если пустить две волны с разностью фаз  $\pi/2$  в два плеча щелевого моста, то они сложатся и поступят только в одно противоположное плечо. Таким образом, если поставить два зеркально-симметричных моста и между ними вставить фазовращатель, то при отсутствии дополнительного набега фазы, мощность из генератора вся поступит во второй мост и далее в одно из его плеч. Если изменить разность фаз  $\pi/2$  между поделенными волнами, то часть мощности начнет отражаться в нагрузку первого моста, а во второй мост будет поступать уменьшенная СВЧ мощность.

Для последующих регулярных ускоряющих структур мощность от одного клистрона делится пополам с помощью вышеописанного волноводного щелевого 3-х дБ-ого моста и поступает в каждую из структур. При этом каждая структура будет иметь свой волноводный фазовращатель, что должно дать возможность точной настройки входных фаз для любого режима работы линейного ускорителя инжектора СКИФ. В качестве волноводной нагрузки используется нагрузка с водяным охлаждением на основе поглощающих резонаторов (**Рисунок 1.1.5.4**), способная поглотить более 50 МВт.



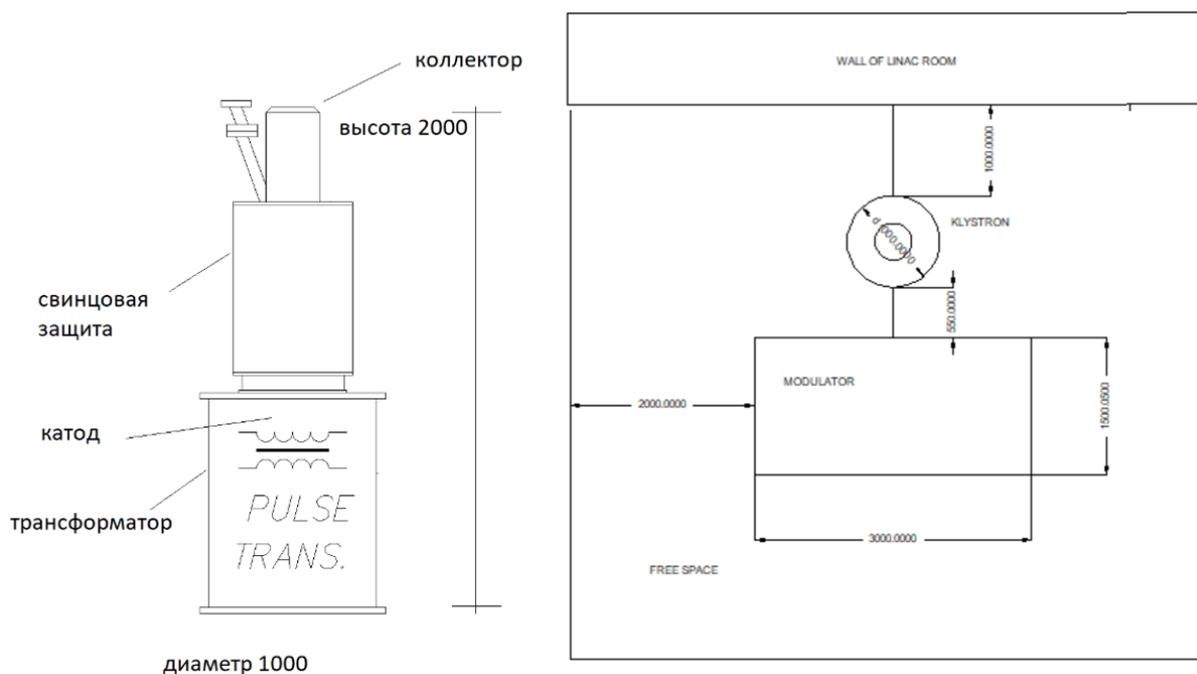
**Рисунок 1.1.5.4.** Волноводная СВЧ нагрузка на 50 МВт.

## 1.1.6 Клистрон

Для линейного ускорителя инжектора СКИФ требуется три клистрона. Для обеспечения бесперебойной работы планируется иметь один резервный клистрон. Схематичный вид клистрона сбоку (с основными размерами) и его размещение в плане показаны на **Рисунке 1.1.6.1**. Клистрон должен располагаться не далее, чем 1 м от модулятора. Вокруг клистрона должна быть свободная зона радиусом 1.5 от внешнего размера клистрона.

Основные параметры клистрона приведены в **Таблице 1.1.6.1**.

В комплект оборудования клистрона также входят: фокусирующий электромагнит с шестью источниками питания (20 А, 10 В, 200 Вт; 31 А, 21 В, 651 Вт; 15 А, 18 В, 270 Вт; 18 А, 21 В, 378 Вт; 13 А, 14 В, 182 Вт; 5 А, 3 В, 15 Вт), радиационная защита обеспечивающая уровень ионизирующего излучения 20 мкЗв/ч на расстоянии 0.3 м от клистрона, магнитоотрядный насос с источником, импульсный масляный трансформатор с высоковольтным кабелем, система блокировок и т.п. Параметры импульсного трансформатора приведены в **Таблице 1.1.6.2.**



**Рисунок 1.1.6.1.** Вид клистрона сбоку (слева) и размещение основных систем клистрона в плане (справа).

**Таблица 1.1.6.1.** Основные параметры клистрона линака-форинжектора СКИФ.

Частота, МГц	2856
Напряжение накала, В	30
Ток накала, А	30
Время поднятия накала, мин	≥ 60
Высокое напряжение, кВ	350
Ток пучка, А	400
Входная СВЧ мощность, Вт	500
Выходная СВЧ мощность, МВт	≥ 50
Микропервеанс, мкА/В <sup>1.5</sup>	2
Выходная средняя мощность, кВт	5÷10
Длительность импульса высокого напряжения, мс	≥ 6.7 <sup>*)</sup>
Длительность СВЧ импульса, мс	≥ 4
Давление остаточного газа, Торр	≤ 10 <sup>-7</sup>

<sup>\*)</sup> На уровне 75% от максимального значения.

**Таблица 1.1.6.2.** Параметры импульсного трансформатора.

Напряжение, кВ	310÷350
Пиковое обратное напряжение пучка клистрона, кВ	100
Ток, А	362÷400
Входное напряжение нагревателя, В	200÷220
Длит. пост. напряжения (на уровне 0.9 от ампл.), мс	4.5
Частота повторения, Гц	≥25

Системы водяного охлаждения (деминерализованная вода в интервале температур 5÷35°C) различных элементов клистрона должны быть рассчитаны на следующие параметры:

- Коллектор клистрона – входное давление ≤1 МПа, перепад давления ≤0.3 МПа, расход воды ≥30 л/мин.
- Выходной волноводный тракт клистрона – входное давление ≤1 МПа, перепад давления ≤0.05 МПа, расход воды ≥2 л/мин.
- Соленоид – входное давление ≤1 МПа, перепад давления ≤0.2 МПа, расход воды ≥10 л/мин на каждую из пяти обмоток питания.

**Таблица 1.1.6.3.** Параметры модулятора клистрона линака СКИФ.

Частота повторения, Гц	≥20
Напряжение накала, В	30
Ток накала, А	30
Высокое напряжение, кВ	350
Ток пучка, А	400
Стабильность напряжения, %	≤ ±0.2
Длительность высокого напряжения, мс	≥6.7 <sup>*)</sup>
Разброс от импульса к импульсу, нс	≤ ± 2
Разброс длительности импульса, нс	≤ ± 4

<sup>\*)</sup> На уровне 75% от максимального значения.

Для линейного ускорителя инжектора СКИФ требуется три модулятора (по числу клистронов) плюс один резервный. Параметры модулятора приведены в **Таблице 1.1.6.3.** В комплект модулятора входят система управления и контроля, система блокировок и т.п.

### 1.1.7 Магнитная система линака

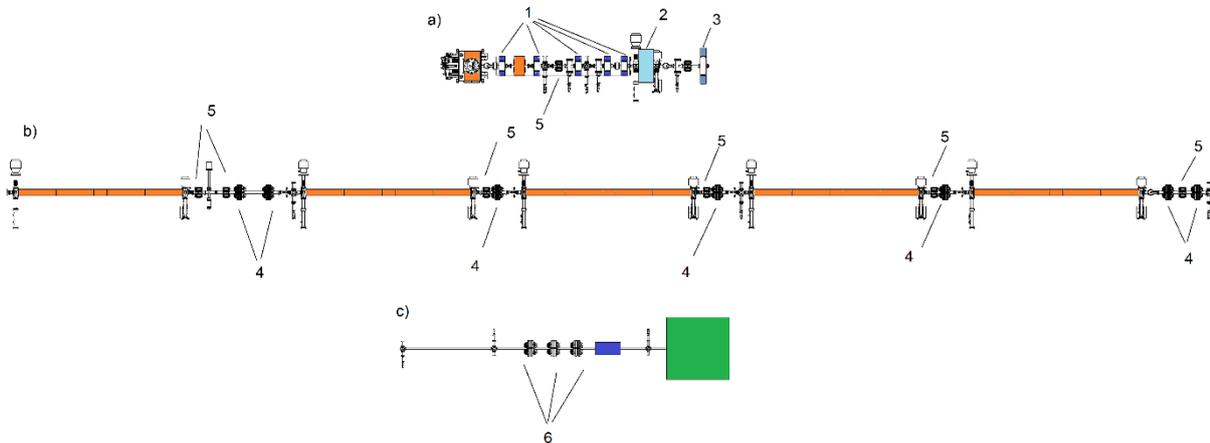
Схема магнитной системы линака показана на **Рисунке 1.1.7.1.** Она призвана обеспечить фокусировку и нацеливание пучка в процессе ускорения, и состоит из:

- Пяти магнитных соленоидальных линз, размещенных до ПГ с частотой 2856 МГц.
- Двух соленоидов непосредственно на предускорителе-группирователе ПГ.
- Одного соленоида, расположенного между ПГ и первой УС.
- Шести магнитных квадрупольных линз в основной ускоряющей секции.
- Трех магнитных квадрупольных линз в коротком диагностическом канале после линака до цилиндра Фарадея.

- Семи-дипольных двухкоординатных магнитов – корректоров траектории пучка.

Для сопровождения пучка от пушки до ПГ используются пять фокусирующих соленоидов (1 на **Рисунке 1.1.7.1**). Рабочий диапазон поля  $0.4 \div 0.7$  кГс. Фокусировка пучка в ПГ важна, поскольку для продольного сжатия используется фаза электрического поля, создающая значительную дефокусирующую силу. Для ПГ необходимо два соленоида с большим внутренним диаметром, чтобы они могли располагаться поверх структуры ПГ (2 на **Рисунке 1.1.7.1**).

Рабочий диапазон роля  $0.55 \div 0.72$  кГс. Между ПГ и первой УС также будет установлен фокусирующий соленоид с апертурой 37 мм, рабочим диапазоном роля  $0.6 \div 0.9$  кГс и максимальным полем 1.7 кГс. После первой ускоряющей секции фокусировка релятивистского пучка производится семью электромагнитными квадрупольными линзами (4 на **Рисунке 1.1.7.1**) с расчетными параметрами, приведенными в **Таблице 1.1.7.1**. Размещение линз, бета-тронные функции и огибающие пучка показаны на **Рисунке 1.1.7.2**. Седьмая квадрупольная линза необходима для согласования пучка с последующим каналом в накопитель. Длина линзы по ярму – 100 мм. Габаритная длина линзы с катушками – 130 мм. Максимальный градиент – 1.2 кГс/см. На выходе линейного ускорителя начинается канал транспортировки пучка к синхротрону и короткий диагностический промежуток, где размещены цилиндр Фарадея, спектрометр и люминофорные датчики поперечного профиля пучка. Для согласования пучка в этом промежутке используются три квадрупольные линзы, конструктивно одинаковые (кроме длины) с линзами канала. Длина линзы по ярму – 150 мм. Габаритная длина линзы с катушками – 300 мм. Максимальный градиент – 1.2 кГс/см.



**Рисунок 1.1.7.1.** Магнитная система линейного ускорителя: а) секция фокусировки и предускорения пучка, б) регулярные УС, с) диагностический прямолинейный канал на выходе линейного ускорителя. Обозначения: 1 – соленоиды системы группировки, 2 – соленоид ПГ, 3 – согласующий соленоид перед первой регулярной УС, 4 – квадрупольные линзы регулярной части линака, 5 – корректоры, 6 – квадрупольные линзы диагностического промежутка.

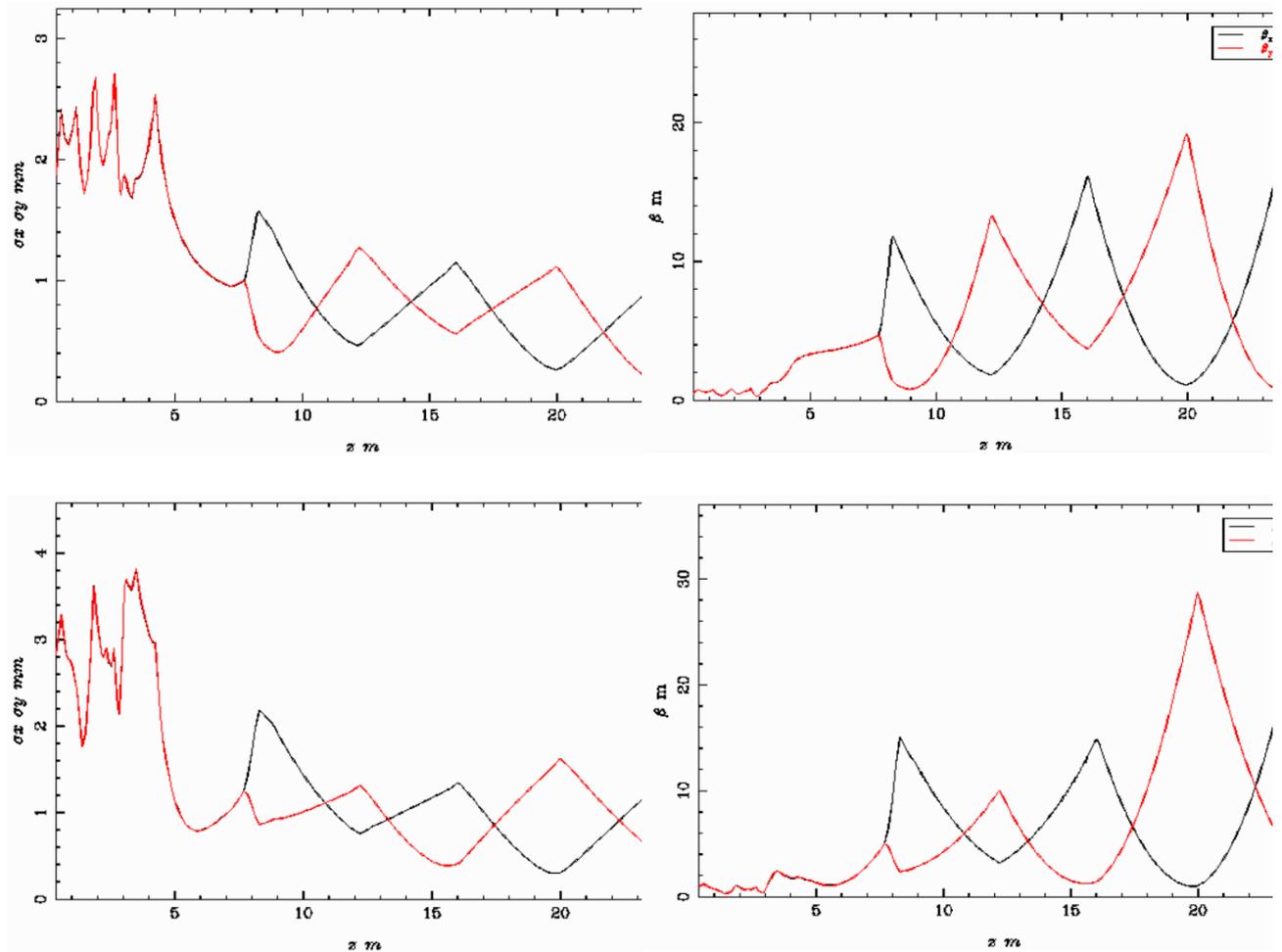


Рисунок 1.1.7.2. Бета-функции (вверху) и огибающие пучка в линаке: заряд сгустка 0.3 нК (сверху), заряд сгустка 1 нК (снизу).

Таблица 1.1.7.1. Параметры магнитных элементов линака.

Магнит	N	L, мм	$B_{max}$ , кГс, $G_{max}$ кГс/см	$\varnothing$ , мм	$\Delta V/V$	Рабочие токи и напряжения
Соленоиды канала группировки	5	100	0.9	37	$\leq 10^{-3}$	5А, 10 В
Соленоид ПГ	2	250	1.0	120	$\leq 10^{-3}$	300 А, 5 В
Согласующий соленоид между ПГ и УС	1	100	1.7	37	$\leq 5 \times 10^{-4}$	5 А, 10 В
Квадрупольные линзы УС	7	100	1.2	40	$\leq 5 \times 10^{-4}$	6А, 2 В
Квадрупольные линзы канала диагностики	3	150	1.2	40	$\leq 5 \times 10^{-4}$	40 А, 1.5 В
Корректоры канала группировки	8	70	0.021	40	$\leq 10^{-3}$	$\pm 3$ А, 10 В
Корректоры регулярной части линака	6	70	0.5	40	$\leq 10^{-3}$	$\pm 6$ А, 2 В

Для нацеливания пучка предусмотрены магнитные дипольные корректоры. На одном ярме намотаны катушки, обеспечивающие отклонение пучка с энергией 200 МэВ на угол  $1^\circ$  как по горизонтали, так и по вертикали.

Основные параметры магнитных элементов линака приведены в **Таблице 1.1.7.1**. Требования на относительную погрешность поля  $\Delta B/B$  для всех магнитов даны для апертуры  $\varnothing 20$  мм. Точность выставки оси фокусирующих элементов (соленоидов и линз) относительно оси линейного ускорителя должна быть лучше 0.1 мм.

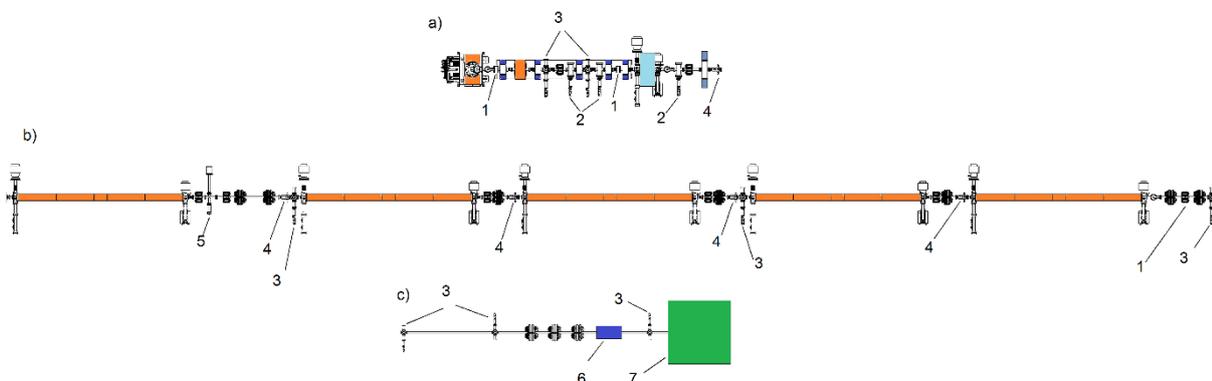
В заключение параграфа приведем параметры пучка на выходе из шестой квадрупольной линзы (на выходе из линака):

- Средний импульс пучка электронов  $\bar{P} = 200$  МэВ/с.
- Горизонтальная бетатронная функция  $\beta_x = 11.9$  м.
- Вертикальная бетатронная функция  $\beta_y = 1.4$  м.
- Нормализованная производная горизонтальной бета-функции  $\alpha_x = -\frac{\beta_x}{2} = 4.96$ .
- Нормализованная производная вертикальной бета-функции  $\alpha_y = -\frac{\beta_y}{2} = -0.87$ .
- Относительный импульсный разброс (rms)  $\sigma_p = 1.2\%$ .
- Эмиттанс пучка  $\approx 18$  п мм мрад (0.3 нКл),  $\approx 35$  п мм мрад (1 нКл).

### 1.1.8 Система диагностики пучка в линаке инжектора СКИФ

Схема размещения элементов диагностики линейного ускорителя показана на **Рисунке 1.1.8.1**. Состав системы диагностики линака приведен в **Таблице 1.1.8.1**.

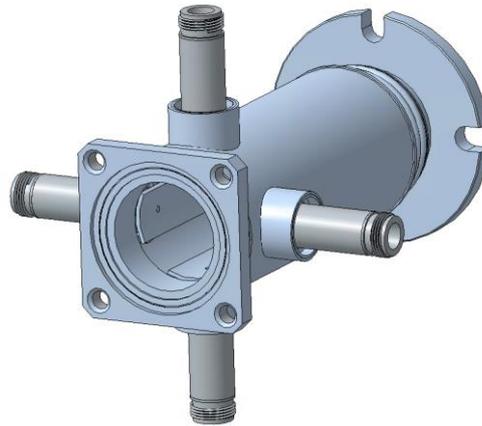
Система измерения положения (поперечных координат) пучка полосковых датчиков-пикапов (4 на **Рисунке 1.1.8.1**) и соответствующей электроники обработки сигналов позволяет отслеживать траекторию пучка по время пролета. Требуемая точность определения координат  $\sim 10\div 20$  мкм. Электроды пикапа представляют собой короткозамкнутые на одном конце 50-омные полосковые линии, в качестве вакуумных вводов использованы ввариваемые вакуумные вводы N-типа (**Рисунке 1.1.8.2**). Апертура датчика – 30 мм, длина – 170 мм.



**Рисунок 1.1.8.1.** Размещение элементов диагностики: а) секция фокусировки и предускорения пучка, б) секция регулярных УС, в) диагностический промежуток. Обозначения: 1 – датчик тока пучка, 2 – датчик черенковского излучения, 3 – люминофоры, 4 – датчик положения пучка, 5 – пучковый датчик-профилومتر, 6 – спектрометр, 7 – цилиндр Фарадея.

**Таблица 1.1.8.1.** Состав и назначение системы диагностики линейного ускорителя.

Датчик	Кол-во	Функция
Полосковый датчик	7	Однопролетное измерение орбиты пучка
Быстрый токовый датчик FCT	3	Измерение абсолютного значения заряда пучка
Люминофорный датчик	8	Измерение положения и поперечной формы пучка
Датчик радиационных потерь	1	Регистрация потерь частиц ускоряемого пучка
Цилиндр Фарадея	1	Измерение заряда пучка
Черенковский датчик	3	Измерение длительности сгустка
Спектрометр	1	Измерение энергии и разброса энергии

**Рисунок 1.1.8.2.** Полосковый датчик положения пучка.

Система измерения поперечного распределения частиц в пучке на основе люминофорных датчиков (3 на **Рисунке 1.1.8.1**) позволяет измерять форму и поперечные размеры пучка. Планируется поставить 2 датчика по ходу пучка для измерения его поперечного профиля при энергии  $E \approx 0.5 \div 0.6$  МэВ, один датчик при энергии 3 МэВ, один датчик при энергии 50 МэВ, один датчик в середине линейного ускорителя и еще 3 в диагностическом промежутке в конце линака. При среднеквадратичном размере пучка  $\sigma_{x,y} \approx 3$  мм видимое пятно на люминофоре имеет размер  $\Delta_{x,y} \approx \pm 3\sigma_{x,y} \approx 20$  мм. Ожидаемое пространственное разрешение датчика около 0.15 мм.

Для измерения заряда частиц в сгустке (сгустках) предусмотрено использование трех быстрых датчиков тока пучка FCT. Планируется использовать быстрые трансформаторы тока FCT производства фирмы Bergoz Instrumentation [8], которые могут работать в сверхвысоком вакууме, оснащены фланцами и не требуют развязки сильфонами (**Рисунок 1.1.8.3**). Основные параметры выбранной модели FCT приведены в **Таблице 1.1.8.2**. Для преобразования выходного сигнала FCT в цифровой вид выбран быстрый цифровой регистратор сигналов (АЦП) DN2.222-02 производства фирмы Spectrum Instrumentation (**Рисунок 1.1.8.3**). Параметры АЦП даны в **Таблице 1.1.8.3**.



**Рисунок 1.1.8.3.** Слева – быстрый трансформатор тока FCT от фирмы Bergoz Instrumentation. Справа – быстрый АЦП DN2.222-02 фирмы Spectrum Instrumentation.

**Таблица 1.1.8.2.** Основные параметры выбранных моделей FCT.

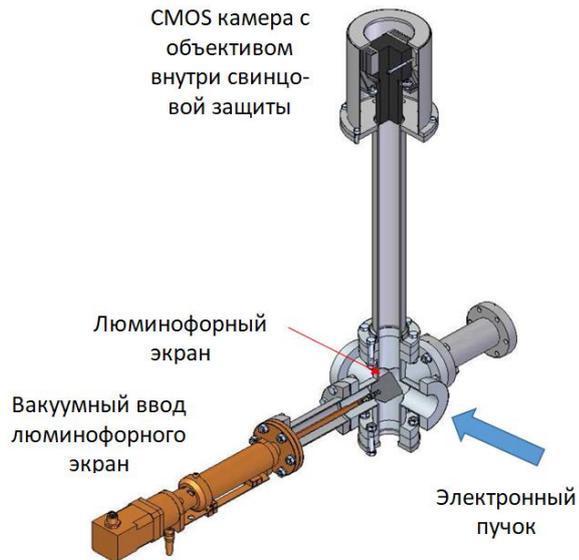
Параметр	Величина
Полоса	1.5 ГГц
Коэффициент трансформации	1:20
Чувствительность	1.25 В/А
Время нарастания выходного сигнала	0.23 нс
Максимальный импульсный ток	400 А (импульс 1 нс)

**Таблица 1.1.8.3.** Основные параметры АЦП DN2.222-02.

Параметр	Величина
Аналоговая полоса	1.5 ГГц
Частота оцифровки	2.5 ГГц
Разрядность	8 бит
Внешняя синхронизация	есть
Кол.-во амплитудных диапазонов	4
Амплитудные диапазоны	от $\pm 200$ мВ до $\pm 2.5$ В

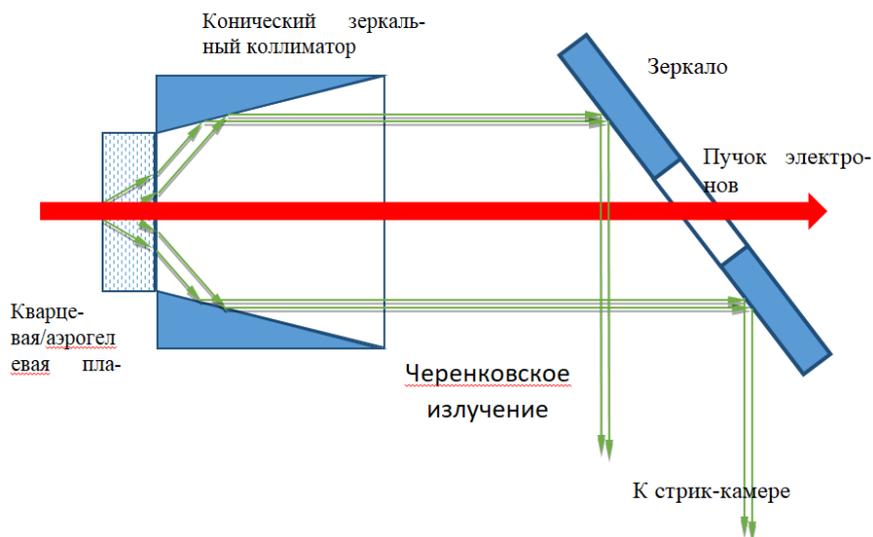
АЦП имеет Ethernet порт 1 ГГбит/сек, через который он подключается к локальной сети комплекса СКИФ.

Поперечное распределение частиц в пучке линейного ускорителя (при энергии 0.6 МэВ, 3 МэВ, 50 МэВ и 200 МэВ) будет исследоваться при помощи люминофорных экранов, вводимых в вакуумную камеру. Предлагается использовать люминофор Р43 либо его аналог, нанесенный на подложку методом электрофореза, такая конструкция может использоваться в высоком вакууме. Внешний вид экрана показан на **Рисунке 1.1.8.4**. Регистрация свечения экрана под действием пучка будет осуществляться CMOS-камерой с объективом, помещенными внутри свинцового стакана-защиты. Месторасположение экранов в структуре линейного ускорителя определяется энергией пучка.



**Рисунок 1.1.8.4.** Схема люминофорного экрана линейного ускорителя.

Продольное распределение частиц в пучке линейного ускорителя предполагается исследовать с помощью черенковского датчика. Действие черенковского датчика основано на испускании электронами черенковского света при движении в кварце либо аэрогеле из кварца. Выбор этих материалов связан прежде всего с их радиационной стойкостью. Коэффициент преломления кварца  $n_k = 1.53$ , коэффициент преломления аэрогеля  $n_a = 1.05$ . Как следует из **Таблицы 1.1.8.4**, максимальная скорость развертки ЭОК равна 10 пс/мм. Если принять длительность импульса пучка равной 10 -15 пс по основанию, то для достижения временного разрешения в несколько пикосекунд требуется сфокусировать на входе ЭОК изображение излучающего объекта в размер не более 0.2 мм, что является непростой задачей. Рассмотрим возможности измерения продольного размера пучка при каждой из трех значений его энергии  $E = 0.6$  МэВ, 6 МэВ, 50 МэВ. Общая концепция датчика одинакова для всех трех случаев и представлена на **Рисунке 1.1.8.5**.



**Рисунок 1.1.8.5.** Схема черенковского датчика для измерения продольного профиля пучка.

Угол при вершине конуса коллиматора будет разным для энергии пучка  $E = 0.6$  МэВ и энергий  $E = 6$  МэВ, 50 МэВ. В качестве рабочего тела датчика (радиатора), в котором электроны испускают черенковское излучение, может использоваться кварц (коэффициент преломления  $n = 1.46$ ) или аэрогель ( $n = 1.05$ ). Временное разрешение датчика зависит от вещества рабочего тела и поперечного размеров пучка на входе в радиатор. Соответствующие данные приведены в **Таблице 1.1.8.4**.

**Таблица 1.1.8.4.** Ограничения временного разрешения черенковского датчика в зависимости от размеров пучка и вещества радиатора.

Размер пучка, мм	Коэф. преломления вещества радиатора	Врем. разрешение, пс
1	1.46	3
3	1.46	9
5	1.46	15
7	1.46	21
1	1.05	1
3	1.05	3
5	1.05	5
7	1.05	7

Прочие факторы, влияющие на временное разрешение метода, подробно разобраны в [9], и в наших условиях ими можно пренебречь. Регистрация черенковских фотонов будет осуществляться стрик-камерой.

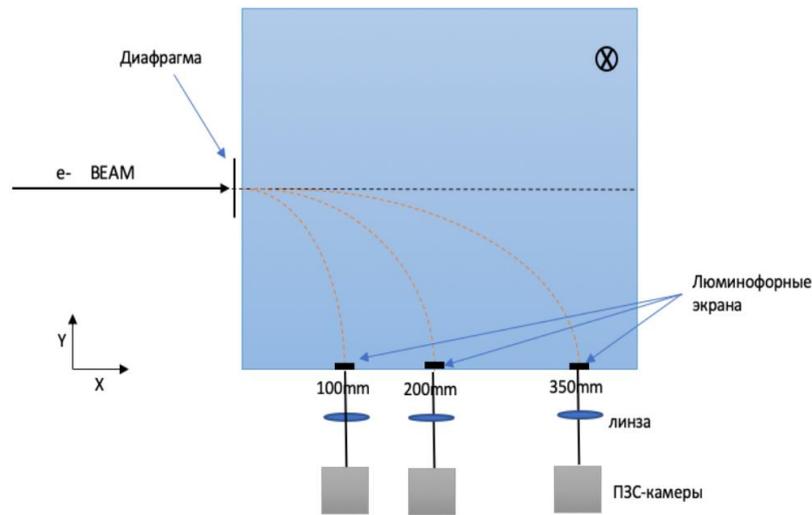
Стрик-камера (**Рисунок 1.1.8.6**) является переносным прибором и предназначена для разовых измерений продольного профиля сгустка в различных ускорителях (линейном, синхротроне-бустере и накопителе). Камера вводится, при необходимости, в состав оптической диагностики пучка для регистрации вспышки черенковского или синхротронного излучения в видимом диапазоне. Свет отводится на стрик-камеру с помощью вводимого зеркала, при этом возможность использовать другие приборы оптической диагностики сохраняется. Предполагается, что стрик-камера будет использоваться для специальных экспериментов с пучком, и будет размещаться в защищенном зале ускорителя на непродолжительное время.



**Рисунок 1.1.8.6.** Внешний вид стрик-камеры PS-1/S1.

При диаметре выходного экрана ЭОП 25 мм у камеры имеется три диапазона длительности развертки 0.25 нс/экран, 0.75 нс/экран и 1.5 нс/экран при скоростях развертки 10 пс/мм, 30 пс/мм и 60 пс/мм. Нестабильность срабатывания (jitter) не более  $\pm 15$  пс. Режим запуска развертки однократный либо периодический с частотой запуска  $0 \div 100$  Гц.

Для настройки линака необходимо измерять энергию (в диапазоне от 0.6 МэВ до 200 МэВ с точностью около 1%) и энергетический разброс пучка (от  $\pm 100$  кэВ при  $E = 0.6$  МэВ до  $\pm 5$  МэВ при полной энергии с точностью  $2 \div 3$  %) с помощью спектрометра (6 на **Рисунке 1.1.8.1**). Схематично магнитный спектрометр показан на **Рисунке 1.1.8.7**. Пучок, отклоненный в поперечном магнитном поле, регистрируется с помощью люминофорного экрана и цифровой камеры.



**Рисунок 1.1.8.7.** Схема магнитного спектрометра для измерения энергии и энергетического разброса пучка.

В **Таблице 1.1.8.5** представлены модельные значения магнитного поля в спектрометре для различных энергий пучка электронов линейного ускорителя, а также энергетический диапазон, соответствующий габаритам люминофорных экранов и их расстоянию  $L$  от места инжекции пучка в спектрометр. Величина  $dE/dx$  является дисперсией энергии в пределах каждого люминофорного экрана.

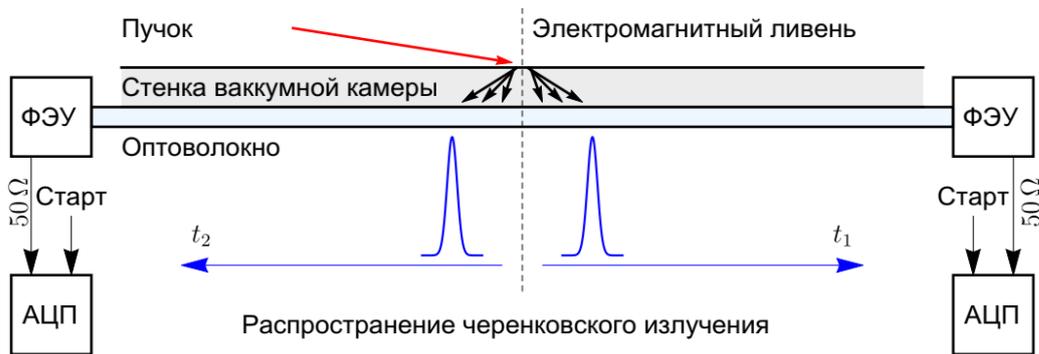
**Таблица 1.1.8.5.** Расчетные параметры люминофорных экранов магнитного спектрометра.

Люминофор	$E_{\min}$ , МэВ	$E_{\max}$ , МэВ	$H$ , Гс	$dE/dx$ , кэВ/мм
$L = 100$ мм, $E = 0.6$ МэВ	0.45	0.966	90.45	20.640
$L = 200$ мм, $E = 6$ МэВ	4.913	6.51	102.1	63.880
$L = 350$ мм, $E = 50$ МэВ	46.41	53.801	298	295.640
$L = 350$ мм, $E = 200$ МэВ	185.64	215.24	1192	1182.56

Для регистрации потерь электронного пучка (в линейных и кольцевых структурах) предполагается использовать распределенный датчик потерь пучка на основе излучения Вавилова-Черенкова в оптоволокне. Условие возникновения черенковского излучения накладывает ограничение на использование данного датчика при малых энергиях пучка. Минимальная

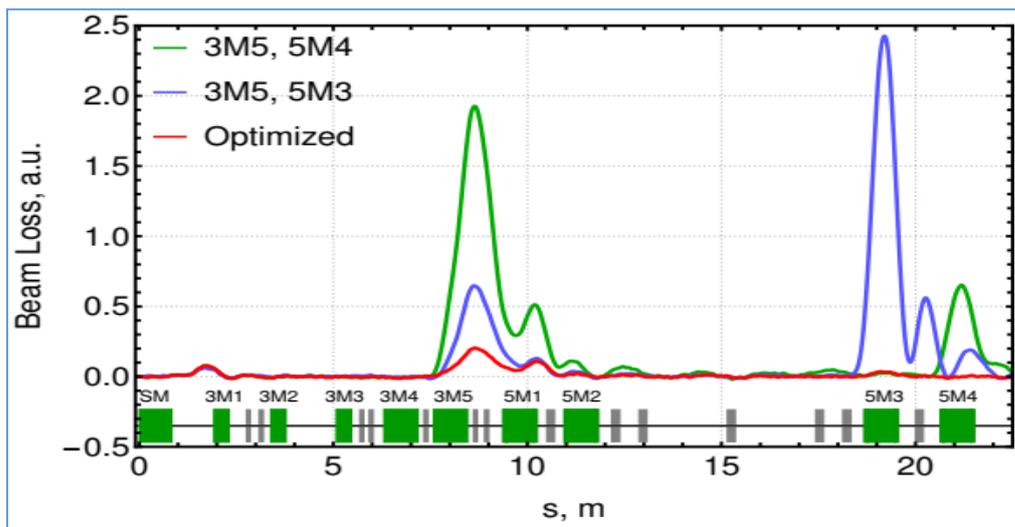
энергия пучка, при которой распределенный датчик может регистрировать потери, составляет 5 МэВ.

Принцип работы датчика потерь основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами электромагнитного ливня, который образуется при попадании пучка на стенку вакуумной камеры ускорителя. Излучение распространяется по оптоволокну и регистрируется с помощью фотодетектора. Сигнал с фотодетектора оцифровывается при помощи АЦП. Время прихода светового импульса дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц. Световой импульс можно регистрировать с обоих торцов оптоволокну. Схема датчика изображена на **Рисунке 1.1.8.8**.



**Рисунок 1.1.8.8.** Схема оптоволоконного датчика потерь пучка.

Опыт использования оптоволоконного датчика на Инжекционном комплексе ВЭПП-5 в ИЯФ [9] позволил подобрать элементы датчика с оптимальными параметрами, удовлетворяющими требованиям к диагностике потерь пучка на СКИФ (**Рисунок 1.1.8.9**).



**Рисунок 1.1.8.9.** Распределение потерь пучка в процессе наладки электронного выпускного канала, вызванные магнитной коррекцией диполей (зеленым, синим), достигнутая оптимальная настройка канала (красным).

Используется кварцевое многомодовое оптоволокно со ступенчатым профилем показателя преломления марки «Thorlabs» (FG550UEC) с параметрами:

- Диаметр сердцевины/оболочки – 550/600 мкм.
- NA = 0.22.
- Максимальный коэффициент затухания 0.01 дБ/м.
- Расчетное значение дисперсии составляет 0.19 нс/м.

Для достижения пространственного разрешения датчика не хуже 1 м оптимальная длина отрезка кварцевого оптоволокна составляет 40 м. Радиационная стойкость кварца позволяет эксплуатировать датчик при дозах до 100 Гр без существенных потерь уровня сигнала.

В качестве фотодетектора используется ФЭУ на МКП производства АО «Катод» со спектральным диапазоном чувствительности фотокатода в максимуме спектра черенковского излучения (300-900 нм), временем нарастания фронта 0.5 нс и длительностью импульса анодного тока (полуширина) – не менее 1.5 нс. Его коэффициент усиления на уровне 10<sup>6</sup>, позволяя регистрировать потери пучка на уровне 1% (0.1 нКл). АЦП следует использовать с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не менее 500 Мвыб/с.

В конце линейного ускорителя предполагается использовать цилиндр Фарадея, который должен обеспечить измерение заряда пучка в диапазоне 0.3÷1 нКл с энергией до 200 МэВ с точностью ≤5%.

### 1.1.9 Требования к вакуумной системе

С помощью шиберов линейный ускоритель при необходимости может быть разделён на три вакуумных объема. Первый включает в себя СВЧ-пушку, второй – систему группировки и предускорения, которая заканчивается ПГ, третий объем состоит из регулярных ускоряющих секций. В рабочем состоянии во всех объемах линейного ускорителя давление остаточного газа должно быть ≤ 10<sup>-9</sup> Торр.

Первый вакуумный объем, включающий СВЧ-пушку, должен отсекается металлическим вакуумным шибером, способным обеспечить автоматическое закрытие объема пушки в случае вакуумной аварии. Остальные секции линейного ускорителя могут отсекается ручными вакуумными шиберами с тефлоновым уплотнением.

Откачка линейного ускорителя осуществляется магнито-разрядными насосами, использование масляных или других насосов, допускающих попадание органических молекул в вакуумный объем линейного ускорителя, недопустимо. Для форвакуумной откачки должно быть предусмотрено достаточное количество мест с шиберной изоляцией. Также линейный ускоритель должен быть оснащен собственным передвижным вакуумным откачным постом.

Во время СВЧ-тренировок элементов линейного ускорителя возможны кратковременные локальные ухудшения вакуума на порядок и более, которые не должны представлять проблему для откачной системы. Необходимо обеспечить непрерывный мониторинг вакуума по току магнито-разрядных насосов. Для измерения давления газа в объеме СВЧ-пушки должен быть предусмотрен отдельный прецизионный датчик (вакуумная лампа).

### 1.1.10 Система охлаждения и термостабилизации линака

С одной стороны, высокочастотные ускоряющие структуры и устройства весьма чувствительны к изменению температуры, с другой – в них выделяется достаточно большая мощность, приводящая к нагреву. Для эффективной, надежной и устойчивой работы линейного ускорителя инжектора СКИФ необходимы системы охлаждения и термостабилизации (СТС) со следующими спецификациями:

- Для всех элементов линака температура входящей воды  $33 \pm 0.1^\circ\text{C}$ .
- Диапазон регулировки температуры входящей воды  $31 \div 35^\circ\text{C}$ .
- Диапазон изменение температуры воды в среднем нагревательными элементами (ТЭНами)  $0.5^\circ\text{C}$ .

С точки зрения СТС возможны два режима работы линака: режим тренировки структуры для уменьшения вероятности СВЧ-пробоев с частотой повторения 20 Гц и рабочий режим с частотой 1 Гц. Необходимые для проектирования СТС данные для обоих режимов приведены в **Таблице 1.1.10.1**.

Предполагается наличие двух контуров системы охлаждения: для элементов, не требующих и требующих СТС с температурой, превышающей температуру окружающей среды ( $\sim 31 \div 35^\circ\text{C}$ ). Первый контур использует деминерализованную воду с температурой  $27 \pm 2^\circ\text{C}$  для охлаждения магнитных элементов. Второй контур, снабженный ТЭНами для термостабилизации воды с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , предназначен для охлаждения СВЧ элементов. Избыточное тепло из этого контура сбрасывается через пластинчатый теплообменник в общую систему охлаждения.

**Таблица 1.1.10.1.** Оборудование, требующие СТС выше температуры окружающей среды.

Элементы	Число/длина, м	Расход воды, л/мин	Рассеиваемая мощность на 1 элемент, Вт		Нагрев воды, $^\circ\text{C}$	
			1 Гц	20 Гц	1 Гц	20 Гц
СВЧ-пушка	1	16	300	6000	0.3	5.4
РГЗ	1	3	2	40	0	0.2
УС1 + СВЧ нагрузка	1	30	100	2000	0	1
УС2 + СВЧ нагрузка	5	30	100	2000	0	1
Волноводы, длина	30	5	-	-	0	0
<b>ВСЕГО:</b>		$\approx 200$	$\approx 902$	$\approx 18000$	0	1.8

Схема контура охлаждения с термостабилизацией воды показана на **Рисунке 1.1.10.1**. Избыточное тепло, снимаемое с элементов СВЧ тракта и ускоряющих секций, сбрасывается через теплообменник в контур общего дистиллята. Теплообмен регулируется клапаном секционного типа с электроприводом, разделяющим потоки в теплообменник и байпас. Далее потоки смешиваются. В контуре термостабилизации вода нагревается до заданной температуры в диапазоне  $31 \div 35^\circ\text{C}$  (зависит от конкретного элемента) ТЭНами.

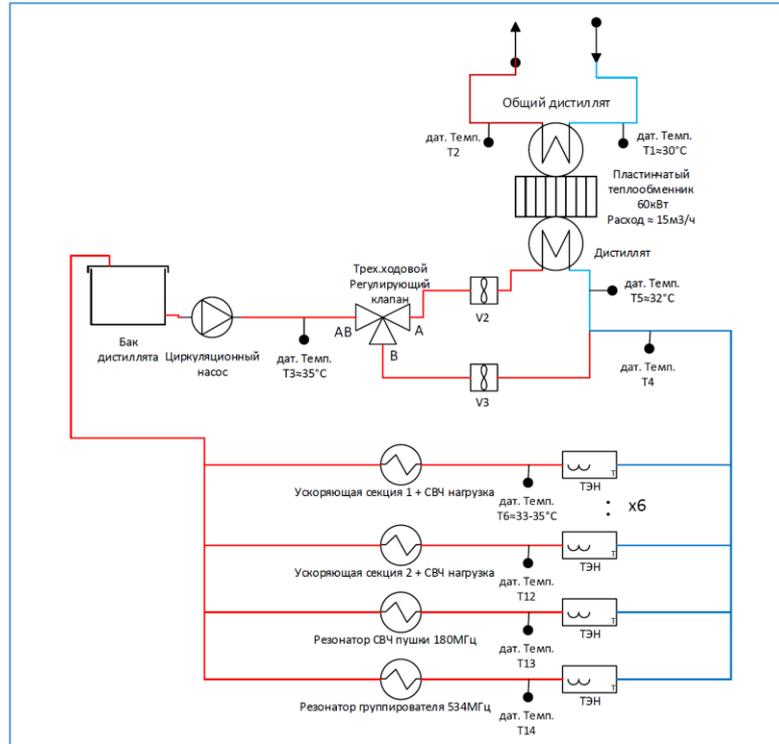


Рисунок 1.1.10.1. Схема контура охлаждения с термостабилизацией.

Нагреватель представляет из себя короб из нержавеющей стали в котором будут находиться три ТЭНа по 4 кВт каждый. В коробе расположены перегородки так, чтобы поток воды проходил и разворачивался обратно вдоль ТЭНа. Питание нагревателей осуществляется от тиристорного регулятора мощности ТРМ-3М [10], который управляется контроллером с обратной связью через датчик температуры на выходе из нагревателя.

## 1.1 Бустерный синхротрон

### 1.2.1. Общее описание

Бустерный синхротрон (бустер) предназначен для ускорения пучка электронов из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ до проектной энергии основного кольца 3 ГэВ. Основные фазы работы бустера – инжекция пучка электронных сгустков, выпущенных из линейного ускорителя, их ускорение до рабочей энергии накопителя с минимальными потерями и выпуск пучка в транспортный канал с параметрами, позволяющими осуществлять инжекцию в основное кольцо с эффективностью близкой к единице. Частота работы бустера 1 Гц. Горизонтальный эмиттанс и энергетический разброс инжектируемого из линака пучка равны  $\epsilon_{xi} = 4\sigma_{xi}\sigma'_{xi} = 1.5 \cdot 10^{-7}$  м-рад и  $(\sigma_E/E)_i < 10^{-2}$  соответственно. Синхротрон будет изготовлен на основе опыта, полученного ИЯФ при разработке, производстве, монтаже и запуске синхротрона для проекта NSLS-II [11], показанного на **Рисунке 1.2.1.1**.

Схема бустера источника СИ СКИФ показана на **Рисунке 1.2.1.2**. Основные параметры даны в **Таблице 1.2.1.1**.



Рисунок 1.2.1.1. Внешний вид синхротрона-бустера NSLS-II.

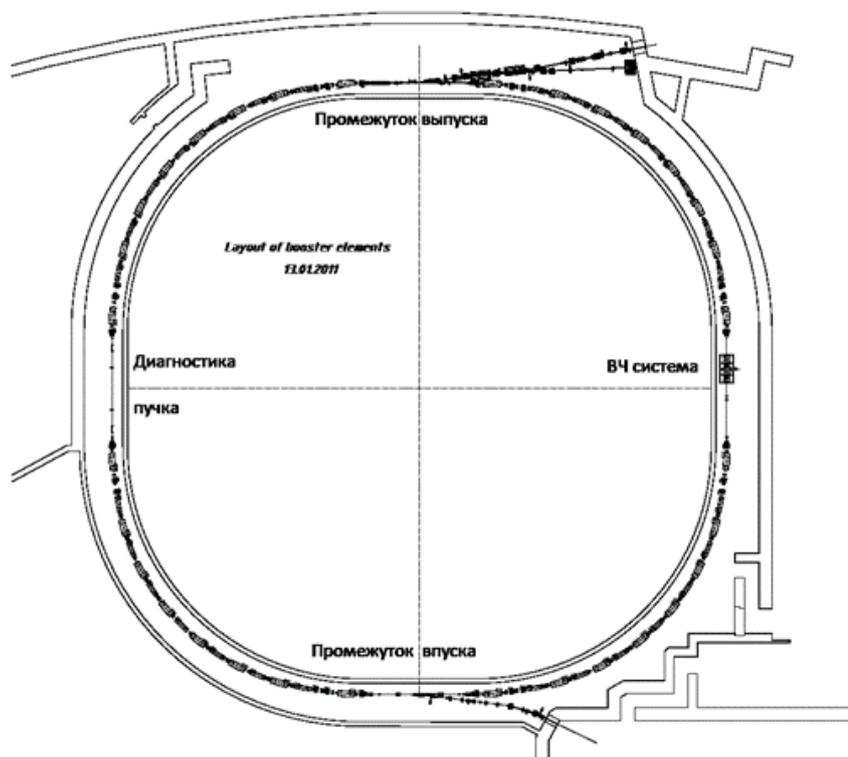
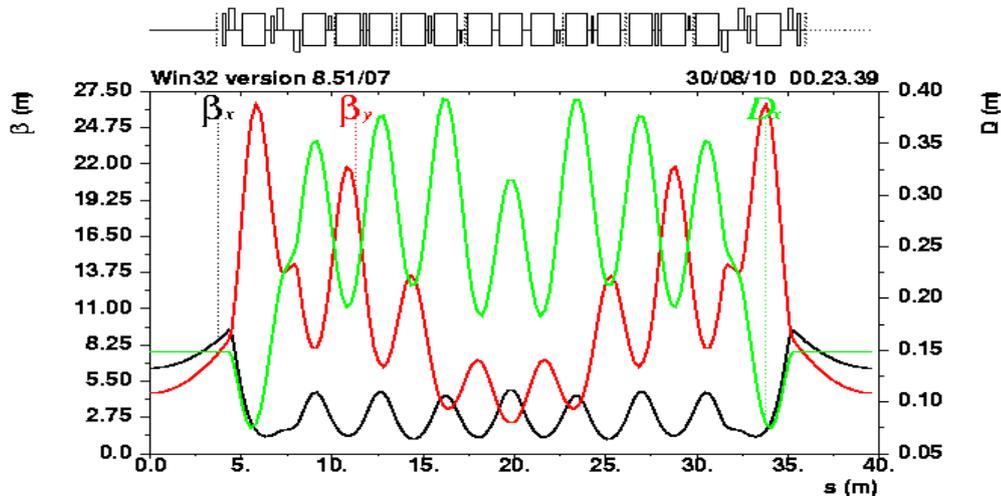


Рисунок 1.2.1.2. Схема магнитной системы синхротрона-бустера проекта СКИФ.

Магнитная структура синхротрона включает четыре квадранта-суперпериода, каждый из которых состоит из пяти стандартных и двух модифицированных ячеек для подавления дисперсии. Квадрант содержит следующие магнитные элементы:

- Восемь дефокусирующих дипольных магнитов (BD) с углом поворота  $8.39^\circ$ ;
- Семь фокусирующих магнитов (BF) с углом поворота  $3.27^\circ$ . Оба диполя представляют собой H-образные изогнутые магниты с параллельными полюсами. Для компенсации хроматизма в них введена секступольная компонента поля;
- Шесть квадрупольных магнитов для настройки бетатронных частот;
- Четыре секступольных магнита для удобства компенсации хроматизма.

Структурные функции одного суперпериода приведены на **Рисунке 1.2.1.3**.



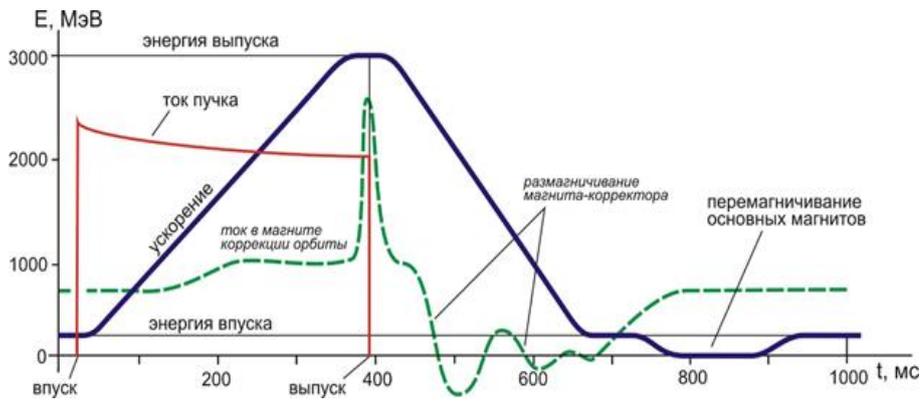
**Рисунок 1.2.1.3.** Оптические функции квадранта синхротрона.

Компактность ячейки и ускорителя достигается применением дипольных магнитов с совмещенными мультипольными компонентами поля (дипольной, квадрупольной и секступольной). Для получения малого эмиттанса необходима сильная фокусировка, которая приводит к появлению значительного натурального хроматизма. Для его коррекции имеется секступольная компонента поля интегрированная в диполи и позволяющая получить рабочее значение хроматизма частот  $(\xi_x, \xi_y) = (+1.2, +2)$ . Две из четырех длинных прямых секции зарезервированы для устройств впуска и выпуска, ещё третья секция зарезервирована для ВЧ-резонаторов и последняя – для устройств диагностики пучка.

**Таблица 1.2.1.1.** Основные параметры бустерного синхротрона на энергиях инжекции и выпуска пучка.

Энергия, ГэВ	0.2	3
Длина окружности, м	158.71	
Максимальный ток, мА		
Период обращения, нс	529	
Бегатронные частоты $\nu_x/\nu_y$	9.645/3.410	
Натуральный хроматизм $\xi_x/\xi_y$	-9.5/-13.5	
Коэфф.уплотнения орбит $\alpha \times 10^3$	8.81	
Частота ВЧ-системы, МГц	357	
Номер ВЧ-гармоники	189	
Амплитуда ускор.напряжения, МВ	0.2	1.2
Синхротронная частота, кГц	30.75	20.9
Энергетический ВЧ-акцептанс $\epsilon_{RF}$ , %	1.96	0.54
Горизонтальный эмиттанс $\epsilon_x$ , нм	0.166	37.4
Разброс энергии $\sigma_E/E \times 10^4$	0.55	8.31
Продольный размер пучка, мм	0.76	19.8
Потери энергии за оборот, $U_0$ , кэВ	0.0135	685.8
Времена затухания $\tau_x/\tau_s$ , мс	$15.6/7.8 \times 10^3$	4.62/2.32

Стандартный цикл работы бустера показан на **Рисунке 1.2.1.4**.



**Рисунок 1.2.1.4.** Временной цикл работы синхротрона-бустера СКИФ.

### 1.2.2 Допуски на качество поля и точность позиционирования магнитов

Магниты с комбинированными функциями требуют высокой точности изготовления и выставки в пространстве согласно расчётному положению. Конструкция и технология изготовления диполей должны обеспечить заданную конфигурацию поля внутри апертуры магнита и ее привязку к геодезическим знакам снаружи магнитопровода, а также, точную выставку магнита относительно остального оборудования ускорителя.

Для эффективной инжекции и ускорения пучка в бустере динамическая апертура должна быть не меньше требуемого акцептанса:

- Радиального  $A_x = 30$  мм-мрад и
- Вертикального  $A_y = 3.6$  мм-мрад.

Эти величины позволяют получить надежные инжекцию и накопление в бустере. Опираясь на эти значения, было изучено влияние ошибок геометрической выставки магнитной системы и дополнительных нелинейностей на размер динамической апертуры.

Следующие факторы могут быть источниками уменьшения акцептанса бустерного кольца:

1. Отличие интегрального значения дипольной компоненты магнитного поля (угла поворота) для различных магнитов приводит к искажению горизонтальной орбиты.
2. Поперечное смещение дипольных магнитов  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  вызывает искажение равновесной орбиты из-за наличия в магните градиента  $G = dB_y/dx$  и секступольной компоненты  $S = d^2B_z/dx^2$ .
3. Поперечное смещение магнитов приводит, из-за наличия секступольной компоненты поля, к возникновению добавочного градиента поля.
4. Мультипольные (октупольные и выше) компоненты магнитного поля, вызванные погрешностями изготовления и сборки магнитов, уменьшают размер динамической апертуры генерируя нелинейные резонансы высокого порядка.

Для анализа влияния ошибок параметров магнитных элементов на оптику кольца было проведено численное исследование движения частиц с использованием программы MAD8 [12]. Каждый тип ошибки вносился случайным образом, и на основе выборки из 1000 результатов определялись допустимые значения погрешностей. Распределение ошибок нормальное, «обрезанное» на уровне двух среднеквадратичных отклонений. Результаты моделирования приведены в **Таблице 1.2.2.1**. В таблице даны относительные допустимые погрешности дипольной, квадрупольной и секступольной компонент поля, ошибки позиционирования магнита в поперечном и продольном направлении, а также ошибки поворота вокруг соответствующей оси.

**Таблица 1.2.2.1.** Среднеквадратичные допуски на ошибки параметров магнитов.

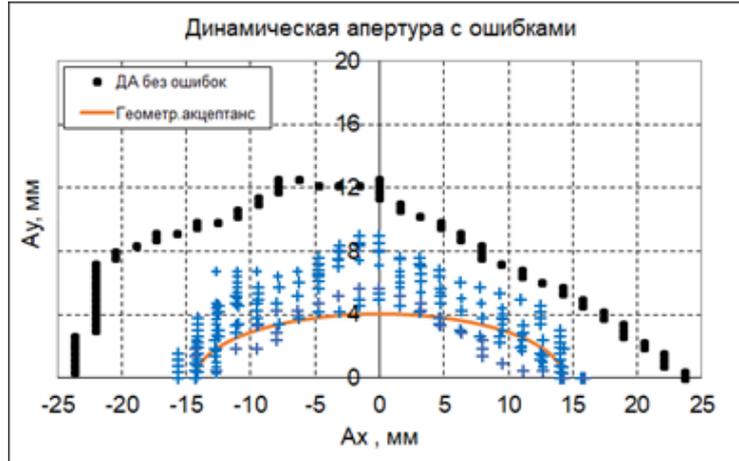
Тип	Значение	Тип	Значение
Допуски поля		Допуски позиционирования	
$\Delta B/B, \%$	0.1	$\Delta x, \Delta y, \text{ мм}$	0.15
$\Delta G/G, \%$	0.5	$\Delta z, \text{ мм}$	0.5
$\Delta S/S, \%$	3.0	$\Delta \alpha_{x,y}, \text{ мрад}$	0.1
		$\Delta \alpha_s, \text{ мрад}$	0.2

Численным моделированием были также определены допуски на мультипольные составляющие магнитного поля. Критерием служил необходимый акцептанс, указанный выше ( $A_x = 30 \text{ мм-мрад}$  и  $A_y = 3.6 \text{ мм-мрад}$ ): совокупное влияние мультиполей (до девятого включительно) должно обеспечить поперечную динамическую апертуру не меньше этого акцептанса. В **Таблице 1.2.2.2** показаны значения допустимых относительных мультипольных ошибок (в единицах  $1 \text{ unit} = 10^{-4}$ ). Ошибки приведены, в виде поля соответствующего мультиполя на радиусе  $R_0 = x_0 = 20 \text{ мм}$ , нормированного на расчетное поле магнита (в медианной плоскости):

$$B_y = B_{y0} + G_0 x_0 + \frac{1}{2} S_0 x_0^2.$$

**Таблица 1.2.2.2.** Относительные допуски на величину мультипольных компонент  $b_n \cdot 10^{-4}$ .

n	Диполь	Квадруполь	Секступоль
0	10000	-	-
1	-	10000	-
2	-	-	10000
3	0.14	2.3	1.4
4	0.57	3.6	3.4
5	0.29	3.6	2.8
6	0.57	9.1	5.7
7	1.1	4.3	11
8	2.3	5.1	14
9	2.8	1.4	27
$\Sigma$	7.8	42	65



**Рисунок 1.2.2.1.** Уменьшение динамической апертуры из-за влияния мультипольных ошибок поля, ошибок позиционирования магнитных элементов, ошибок интеграла поля, градиента и секступольной составляющей. Красная линия – требуемая апертура, черные точки – апертура без погрешностей, синие кресты – апертура с ошибками.

Суммарная неоднородность поля магнита в горизонтальной области  $\pm 20$  мм от оси пучка составляет:

$$\frac{\Delta B(x=20 \text{ мм})}{B_0(x=20 \text{ мм})} \leq \pm 1 \cdot 10^{-3}.$$

На **Рисунке 1.2.2.1** показано изменение динамической апертуры из-за ошибок высших мультиполей, ошибки пространственной выставки магнитов, градиента и секступольной компоненты магнитного поля элементов.

Результирующая динамическая апертура (среднее значение) удовлетворяет поставленным требованиям, поскольку превышает заданный акцептанс. Апертура приводится для начальной точки структуры на **Рисунке 1.2.1.3** где  $\beta_{x0} = 6.45$  м,  $\beta_{y0} = 4.62$  м.

### 1.2.3 Коррекция хроматизма

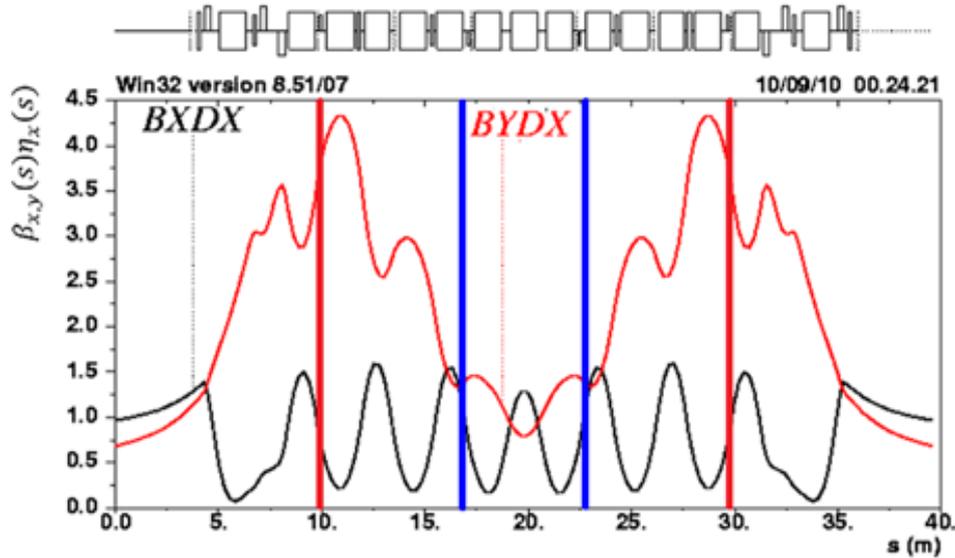
Натуральный хроматизм бетатронных частот равен  $\xi_{x0} = -9.5$  и  $\xi_{y0} = -13.5$ . Для его компенсации, как уже говорилось, в дипольные магниты введена секступольная компонента поля, которая корректирует хроматизм кольца до значений  $\xi_x = +1.25$  и  $\xi_y = +2.05$ .

Для настройки хроматизма бетатронных частот (например, при ускорении из-за возможной разбалансировки полей индивидуальных магнитов) в синхротроне предусмотрены два семейства отдельно стоящих секступольных корректоров SF и SD. Изменение хроматизма секступольными линзами имеет вид

$$\Delta \xi_{x,y} = \pm \frac{1}{4\pi} \oint K_2(s) \beta_{x,y}(s) \eta_x(s) ds,$$

где  $K_2(s) = B''(s)/B\rho$  – приведенная сила секступольной линзы,  $\beta_{x,y}(s)$  и  $\eta_x(s)$  – бетатронные и дисперсионные функции. Величину  $\beta_{x,y}(s)\eta_x(s)$  можно считать мерой эффективности секступольной коррекции хроматизма частот: чем это произведение больше, тем меньше

силы секступольных линз нужны. Произведение  $\beta_{x,y}(s)\eta_x(s)$  для одного квадранта синхротрона показано на **Рисунке 1.2.3.1**. Для постановки секступолей выбраны азимуты с высокой эффективностью.

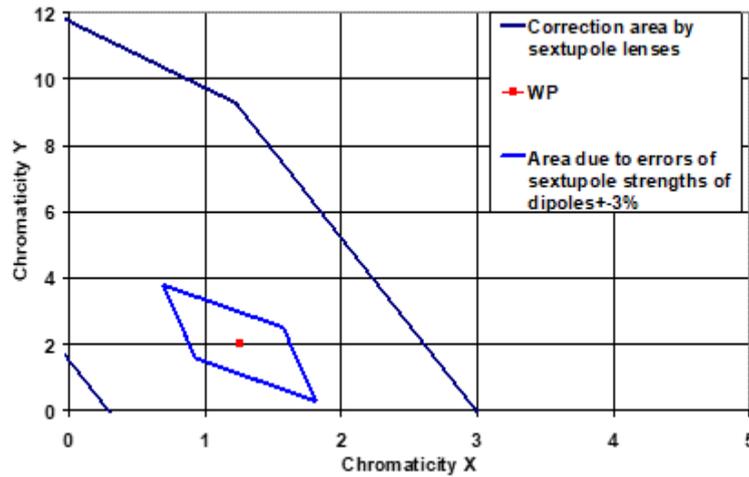


**Рисунок 1.2.3.1.** Величина  $\beta_{x,y}(s)\eta_x(s)$ , показывающая эффективность коррекции секступольными линзами хроматизма бетатронных частот. Размещение секступольных линз показано вертикальными линиями.

Всего в структуре синхротрона имеется по восемь фокусирующих SF и дефокусирующих SD секстопольных корректоров. Диапазон доступной коррекции хроматизма этими линзами показан на **Рисунке 1.2.3.2**. Здесь же показана область изменения значений хроматизма (ромб вокруг рабочей точки), из-за возможных ошибок секступольной составляющей дипольных магнитов с относительной величиной  $\Delta B''/B'' \leq \pm 3\%$ . Видно, что доступный диапазон регулировки хроматичности секступольными корректорами существенно превосходит область возможной ошибки.

Аналогично вариации бетатронных частот во время ускорения, неоднородность насыщения ярма поворотных магнитов приводит и к малому изменению хроматизма частот  $(\Delta\xi_x, \Delta\xi_y)$ . Это смещение так же корректируется динамическим изменением тока линз SF и SD во время подъема поля согласно зависимости, найденной расчетным путем:

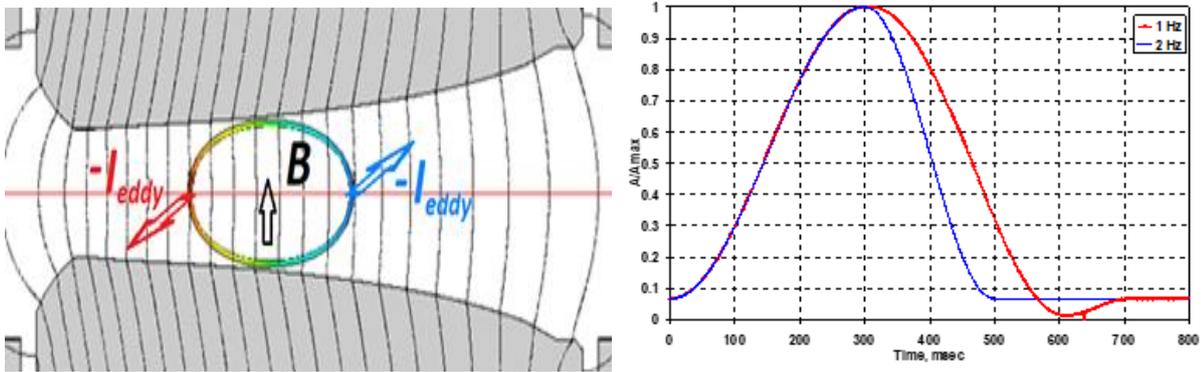
$$\begin{pmatrix} \Delta K_{2SD} \\ \Delta K_{2SF} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 29.59 & 5.64 \\ -11.18 & -5.56 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\xi_x \\ \Delta\xi_y \end{pmatrix}.$$



**Рисунок 1.2.3.2.** Диапазон изменения хроматизма бетатронных частот секступольными корректорами. Также показана область хроматизма из-за ошибок секступольной компоненты в дипольных магнитах (ромб вокруг рабочих значений хроматизма).

### 1.2.4 Вихревые токи в вакуумной камере

Во время ускорения пучка в синхротроне поле поворотных магнитов меняется во времени и в вакуумной камере, сделанной из материала с конечной проводимостью (нержавеющая сталь), наводятся вихревые (индукционные) токи, которые, в свою очередь, являются источниками магнитного поля, искажающего поле магнита без вакуумной камеры. Схематичное изображение вихревого тока в камере синхротрона и график тока питания диполей во времени показаны на **Рисунке 1.2.4.1**.



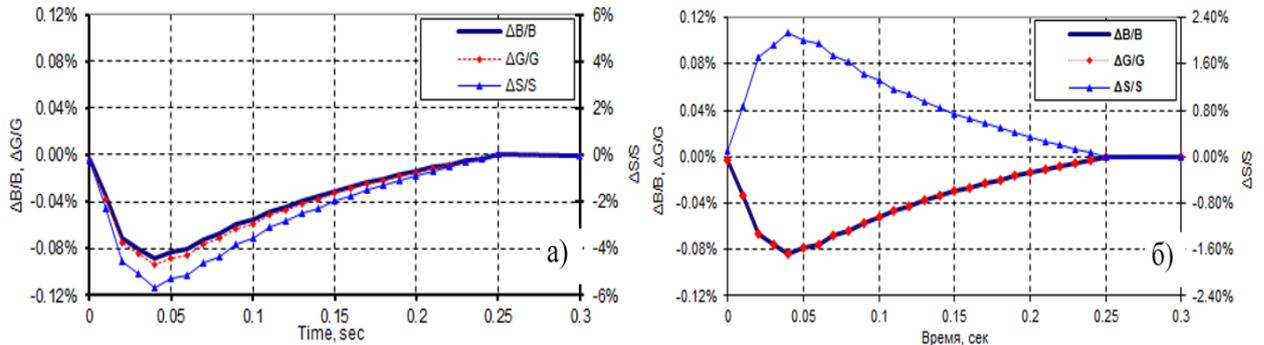
**Рисунок 1.2.4.1.** Слева – направление и плотность (показана цветом) вихревых токов в вакуумной камере диполя ВD (схематично). Справа – относительное изменение тока питания магнитов бустера во времени для частоты инжекции 1 Гц (красная кривая) и 2 Гц (синяя кривая).

Если вакуумная камера симметрична относительно осей  $x$  и  $y$ , что имеет место в нашем случае, а полюса магнита плоскопараллельны, то в медианной плоскости поле, вызванное вихревыми токами вертикально, и первые два члена его мультипольного разложения – это дипольная и секступольная компоненты:

$$B_{ey}(x, 0) = \mu_0 \sigma \frac{dB_{0y}}{dt} (f_0 + f_2 \cdot x^2),$$

где  $B_{0y}$  – поле магнита без камеры,  $\sigma$  – проводимость материала камеры, а факторы  $f_{0,2}$  учитывают форму, размеры и толщину стенок вакуумной камеры, и для прямоугольной и эллиптической форм аналитически найдены в [12].

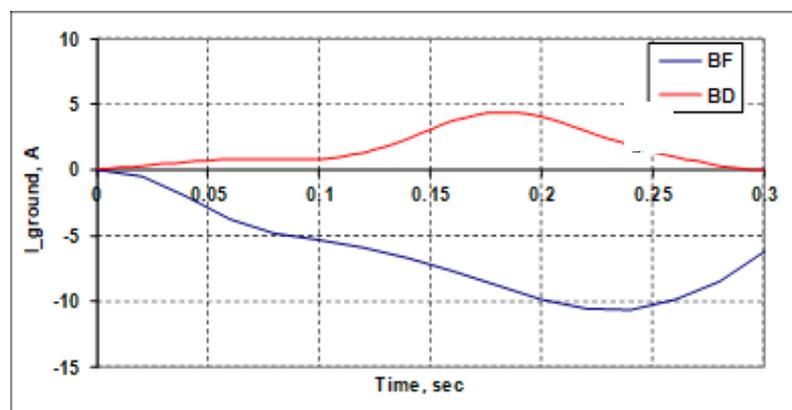
Наведенные в вакуумной камере синхротрона-бустера токи моделировались с помощью компьютерного кода ANSYS [13]. Вакуумная камера дипольного магнита изготавливается из нержавеющей стали с толщиной стенки 1 мм и поперечным сечением  $41 \times 24$  мм<sup>2</sup>. Удельное сопротивление стали принимается  $72 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. На **Рисунке 1.2.4.2** показано относительное отклонение магнитных мультиполей от идеальных для магнитов BD и BF.



**Рисунок 1.2.4.2.** Относительное изменение компонент магнитного поля из-за вихревых токов в вакуумной камере магнитов BD (а) и BF (б).

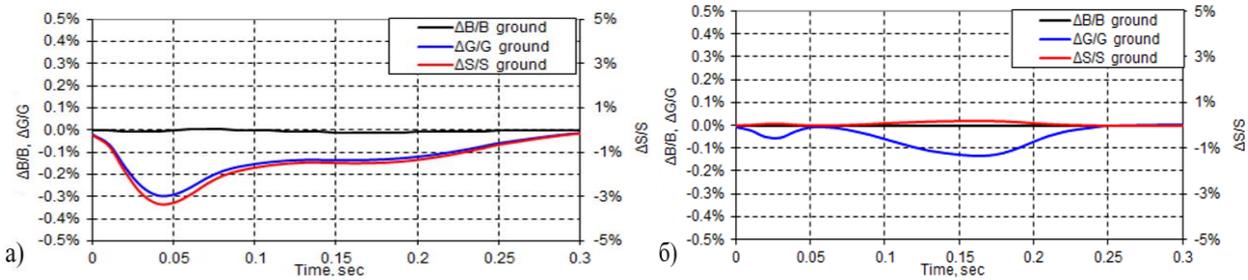
Вихревые токи в стенках камеры приводят к примерно одинаковому относительному отклонению магнитного поля и градиента  $\Delta B/B_e \approx \Delta G/G_e \approx -1 \cdot 10^{-3}$ , которое может быть скорректировано простым изменением тока питания магнита. После такой коррекции бетатронные частоты возвращаются в проектную точку. Причиной появления градиента поля из-за вихревых токов является то, что полюса магнита не плоскопараллельны. Из-за этого симметрия распределения токов в камере относительно оси  $y$  нарушается.

Отдельно изучался вопрос заземления вакуумной камеры синхротрона. Из-за нарушения симметрии распределения токов в камере относительно оси  $y$ , полный ток через камеру не равен нулю. График тока от времени через заземляющие проводники показан на **Рисунке 1.2.4.3**.



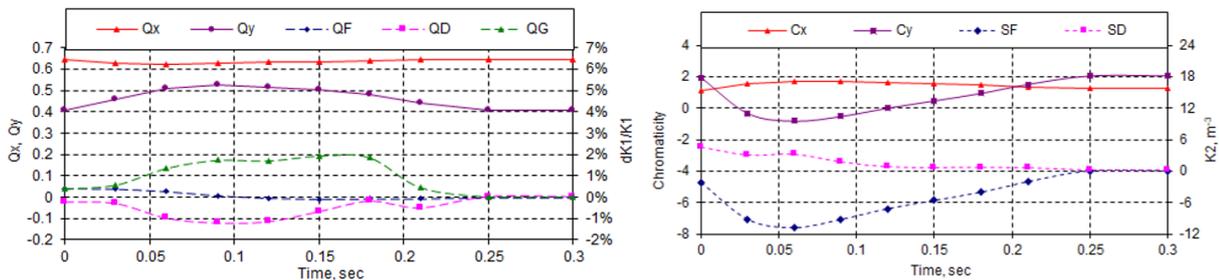
**Рисунок 1.2.4.3.** Ток в заземлителе вакуумной камеры.

Ток заземления, протекающий через вакуумную камеру, создает дополнительные квадрупольную  $\Delta G/G_g$  и секступольную  $\Delta S/S_g$  компоненты поля и слегка меняет дипольную  $\Delta B/B_g$ . Соответствующие графики показаны на **Рисунке 1.2.4.4**.



**Рисунок 1.2.4.4.** Изменение поля, градиента и секступольной составляющей от времени из-за заземления вакуумной камеры для магнитов BF (а) и BD (б).

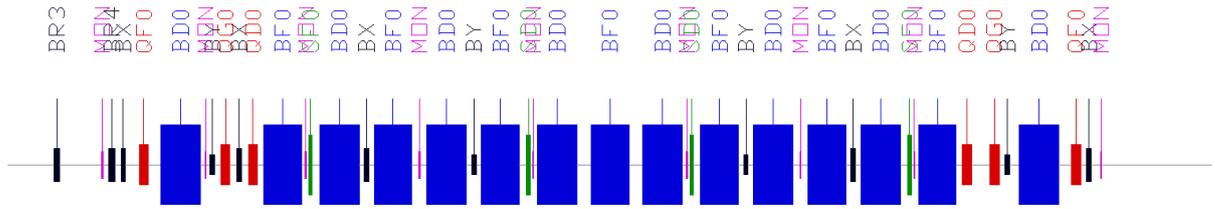
Суммарный эффект от токов индукции и заземления приводит во время ускорения пучка к большим динамическим изменениям бетатронной частоты ( $\Delta\nu_y > 0.1$ ) и хроматизма частот, что показано на **Рисунке 1.2.4.5**. Пересечение вертикального полуцелого резонанса и отрицательное значение хроматизма во времени подъема поля приведет к гибели пучка. Для компенсации этих эффектов используются квадрупольные QD, QF, QG и секступольные SF и SD линзы.



**Рисунок 1.2.4.5.** Изменение бетатронных частот (а) и хроматизма (б) из-за влияния токов, текущих в вакуумной камере поворотных магнитов во время ускорения. Здесь же показаны графики относительного изменения значений линз QD, QF, QG и SF, SD, необходимых для коррекции.

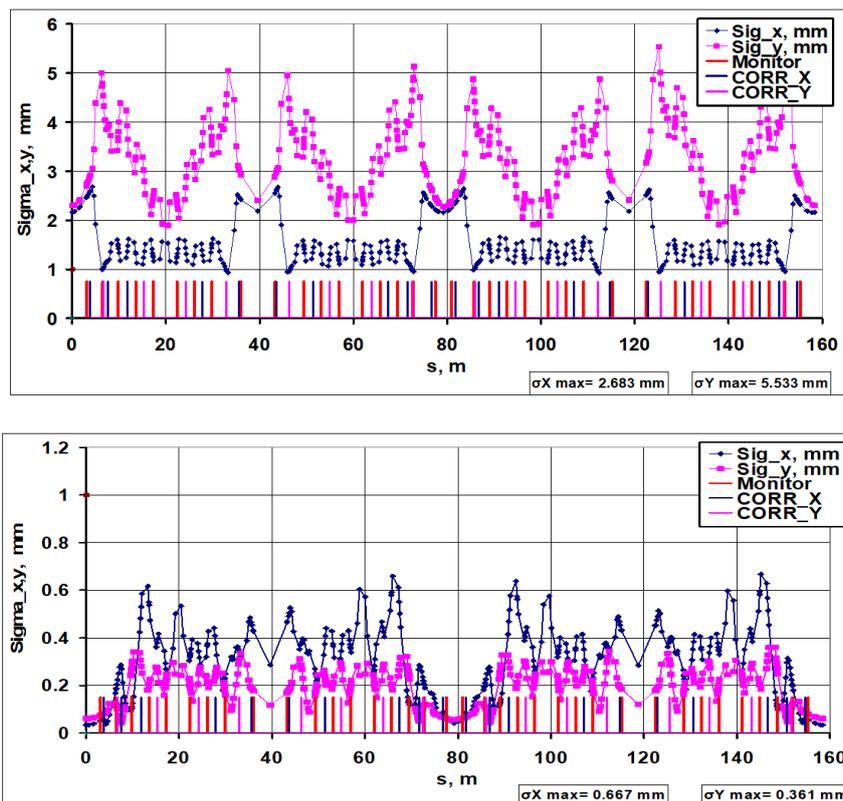
### 1.2.5 Коррекция замкнутой орбиты и оптики

Смещение и повороты магнитов, а также, отличие поля от расчетного значения приводят к искажению замкнутой орбиты, оптических функций и появлению связи бетатронных колебаний. Система коррекции орбиты кольца состоит из 36 датчиков положения пучка (beam position monitor, BPM), 20 горизонтальных и 16 вертикальных магнитов-корректоров. Количество BPM и корректоров выбиралось так, чтобы обеспечить необходимую коррекцию орбиты при разумных силах корректоров. BPM устанавливаются рядом с дипольными магнитами и в прямолинейных участках кольца. Вертикальные и горизонтальные корректоры размещаются в каждой второй ячейке вблизи фокусирующих и дефокусирующих квадрупольных линз. Размещение элементов системы коррекции для одного квадранта показано на **Рисунке 1.2.5.1**.



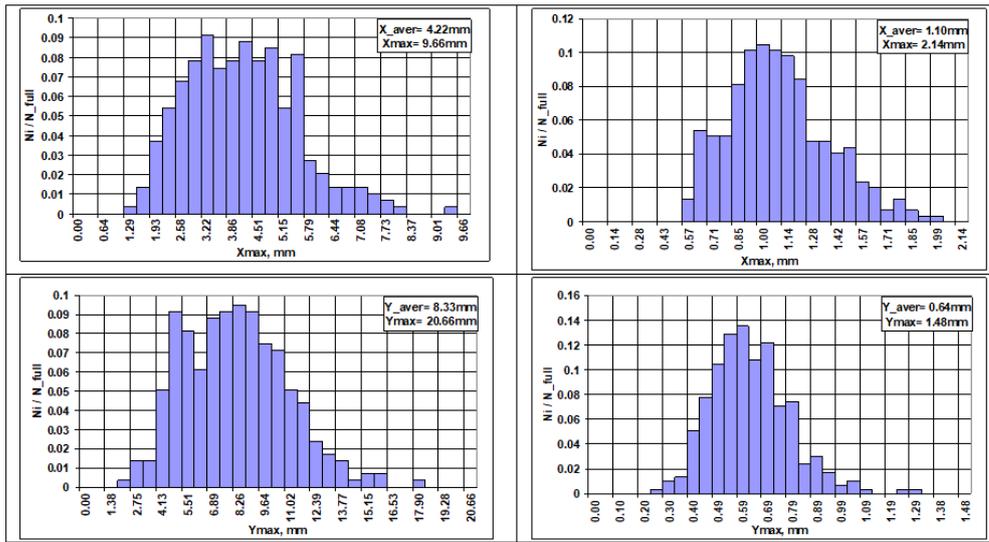
**Рисунок 1.2.5.1.** Расположение магнитов и элементов коррекции орбиты. Обозначения: VX, VY – горизонтальный и вертикальный корректор; MON – датчик положения луча; BD, BF – дефокусирующий и фокусирующий поворотный магнит; QF, QD, QG - квадрупольные линзы; SF, SD – секступольные линзы.

Искажение замкнутой орбиты приводит также к возмущению оптических функций и смещению бетатронных частот. Моделирование и коррекция этих эффектов проводились с помощью программы MAD-X [14] стандартным образом. Ошибки выставки и поля вводились в магниты бустера случайным образом с нормальным распределением по заданному стандартному отклонению  $\sigma$  (взятому из Таблиц 1.2.2.1 и 1.2.2.2), которое «обрезалось» на уровне  $\pm 2\sigma$  для отсечки нереально больших значений.



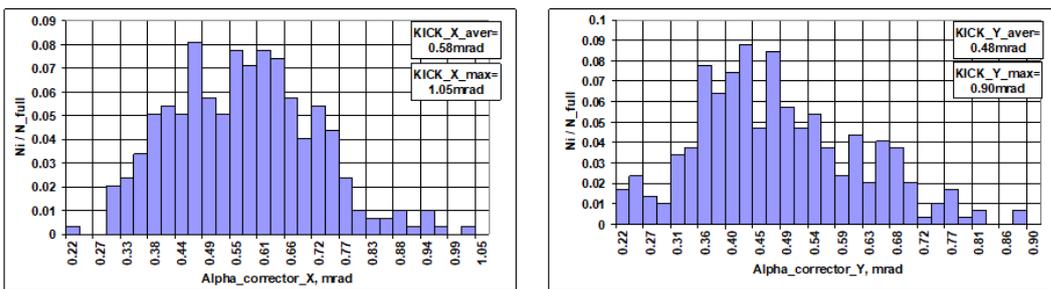
**Рисунок 1.2.5.2.** Среднеквадратичное отклонение замкнутой орбиты до (вверху) и после коррекции.

На **Рисунке 1.2.5.2** представлены статистические результаты для коррекции замкнутой орбиты кольца и оптических функций по 500-ам выборкам.



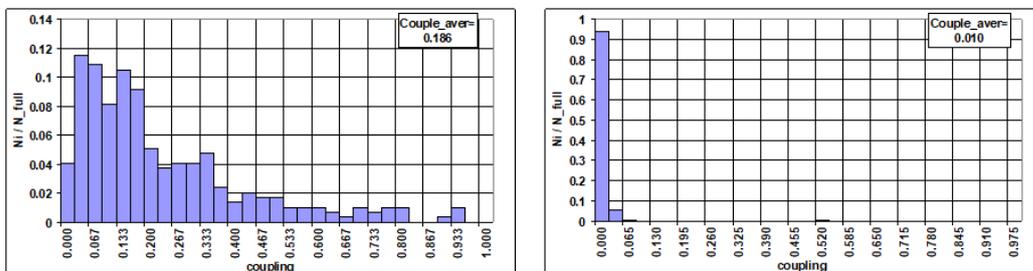
**Рисунок 1.2.5.3.** Максимальное искажение орбиты для горизонтального и вертикального движения (верх/низ), до и после коррекции (лево/право).

Для коррекции орбиты с результатами, показанными на **Рисунке 1.2.5.3**, необходимы корректоры с силами, приведенными на **Рисунке 1.2.5.4**.



**Рисунок 1.2.5.4.** Распределение сил корректоров, необходимых для исправления искажения орбиты для максимальной энергии пучка по 500 выборкам.

Искажение орбиты вносит линейную связь бетатронных колебаний  $\kappa = \epsilon_y / \epsilon_x$ , величина которой для 500 случайных выборок, до и после коррекции показана на **Рисунке 1.2.5.5**.



**Рисунок 1.2.5.5.** Величина бетатронной связи до (слева) и после коррекции орбиты.

После коррекции орбиты бетатронные частоты и хроматизм частот компенсировались квадруполями QF, QD и QG и секступолями SF и SD.

## 1.2.6 Оценка эффективности инъекции в бустер

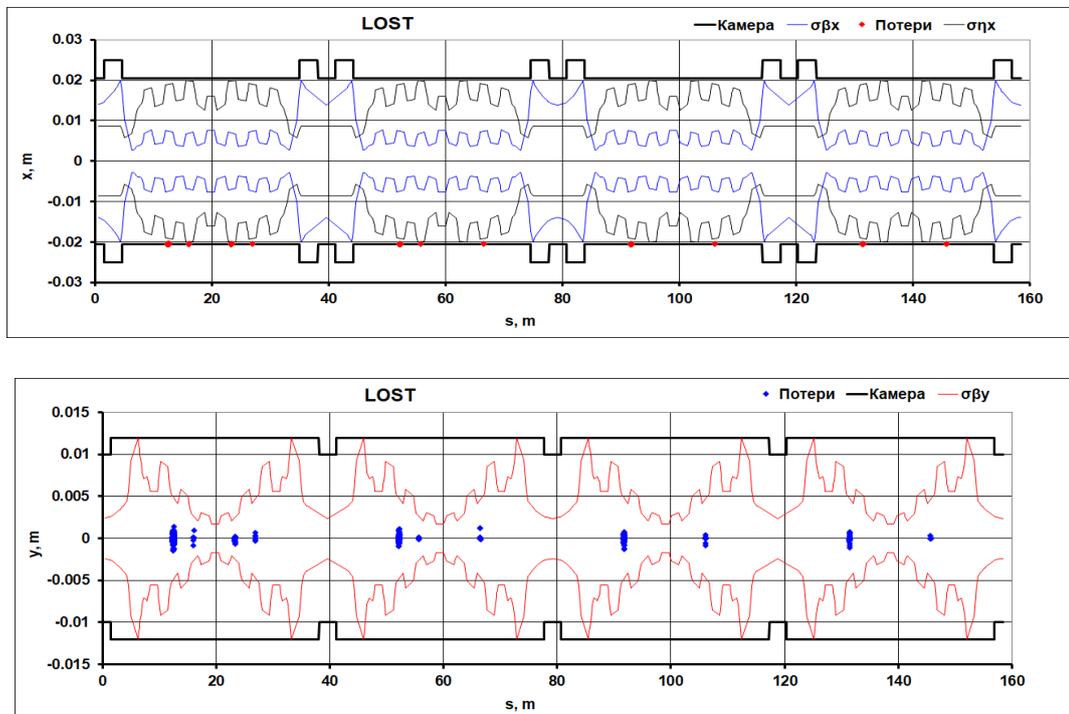
Эффективность инъекции пучка из линака в бустер должна быть  $\geq 90\%$ . Потери частиц могут быть вызваны

- Малой величиной сепаратрисы синхротронных колебаний,
- Уменьшенным поперечным акцептансом из-за ошибок магнитного поля, искажающих оптические функции,
- Недостаточным размером динамической апертуры.

Параметры пучка из линака в многосгустковом и односгустковом режимах приведены в **Таблице 1.2.6.1**. Напомним, что в первом случае предусматривается заряд в одном сгустке  $\approx 0.3$  нКл, а во втором  $\approx 1$  нКл.

**Таблица 1.2.6.1.** Параметры пучка на выходе линейного ускорителя.

Заряд в сгустке, нКл	0.3	1
Средняя энергия, МэВ	206	192
Разброс энергии $\sigma_E$ в сгустке, МэВ	0.50	1.82
Отн.разброс энергии в сгустке $\sigma_E/E$ , %	0.24	0.95
Отл.энергии в цуге из-за нагрузки структуры током пучка (без/с компенсацией), %	4÷3	-
$\varepsilon_{ynorm}$ , мм-мрад	20.9	34.5
$\varepsilon_{xnorm}$ , мм-мрад	20.3	40.9



**Рисунок 1.2.6.1.** Локальные акцептансы вдоль кольца и места наиболее вероятной потери частиц. Вверху – для горизонтального, внизу – для вертикального движения. Вакуумная камера изображена сплошной черной линией.

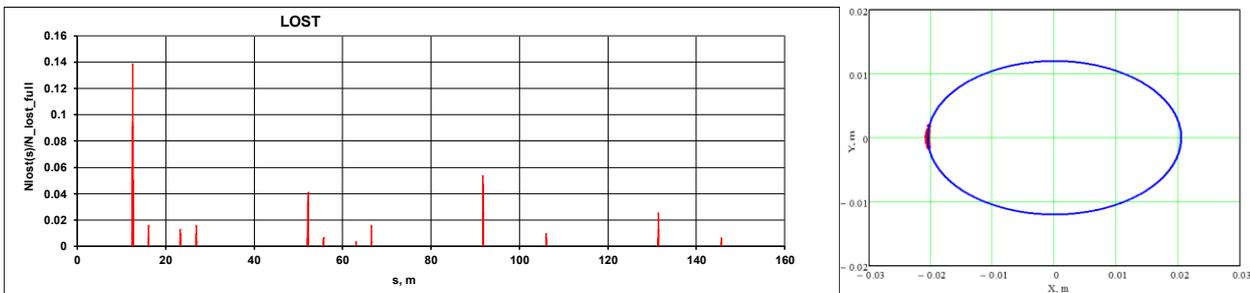
Длинный цуг импульсов тока подгружает структуру линейного ускорителя, и отличие энергии  $\approx 3\div 4\%$  между первым и последним сгустками может вызывать потери пучка на границе устойчивости продольного движения. Этим и определяется максимальная интенсивность сгустка  $\approx 0.3$  нКл. Разброс энергий в одном сгустке мал и не влияет на эффективность инжекции.

Для определения эффективности захвата пучка и определения возможных мест его потери по время инжекции было проведено математическое моделирование процесса инжекции для случаев, когда нет искажения орбиты и оптики (регулярная работа, все возможные возмущения скомпенсированы) и для одной из 500 выборок с искажением орбиты, что соответствует начальному этапу запуска бустера. В первом случае потери пучка малы, во втором могут достигать значительных величин. На **Рисунке 1.2.6.1** показаны графики локального акцептанса согласно

$$\sigma_{\beta_{x,y}}(s) = \sqrt{\beta(s)_{x,y} \left[ \frac{d_{x,y}^2(s)}{\beta_{x,y}(s)} \right]_{min}}, \quad \sigma_{\eta x}(s) = \eta(s) \frac{\Delta p}{p_0} \left[ \frac{d_x}{\eta(s)} \right]_{min},$$

где  $\beta_{x,y}$  – бетатронные функции,  $\eta$  – горизонтальная дисперсионная функция,  $d_{x,y}$  – полуширина вакуумной камеры по соответствующему направлению.

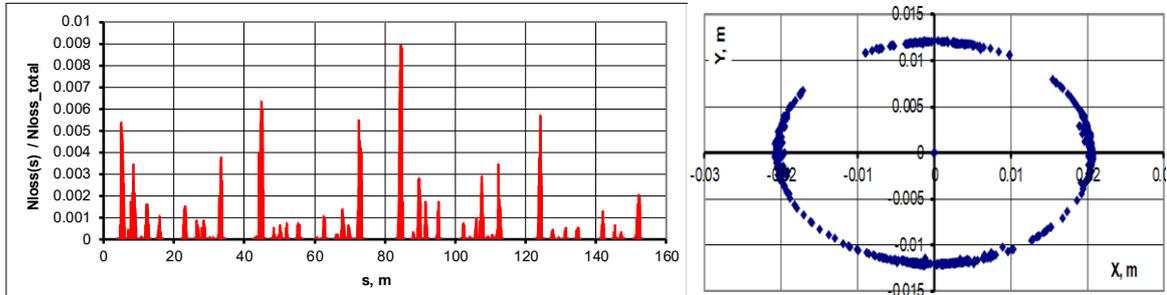
**Рисунок 1.2.6.2** соответствует случаю, когда искажения орбиты и оптики пренебрежимы. Результаты моделирования потерь пучка, состоящего из 55 сгустков (основной режим инжекции) с полным зарядом 15 нКл, энергетическим разбросом в отдельном сгустке 0.24%, отличием энергии «голова-хвост» 4% и с учетом радиационных эффектов показаны на **Рисунках 1.2.6.1 и 1.2.6.2**.



**Рисунок 1.2.6.2.** Слева – относительное распределение потерь вдоль кольца (0 – азимут впуска). Справа – поперечное сечение вакуумной камеры и локализация потерь пучка при инжекции цуга из 55 сгустков для идеальной структуры с учетом радиационных потерь. Отрицательные значения оси абсцисс соответствует внутреннему радиусу кольца.

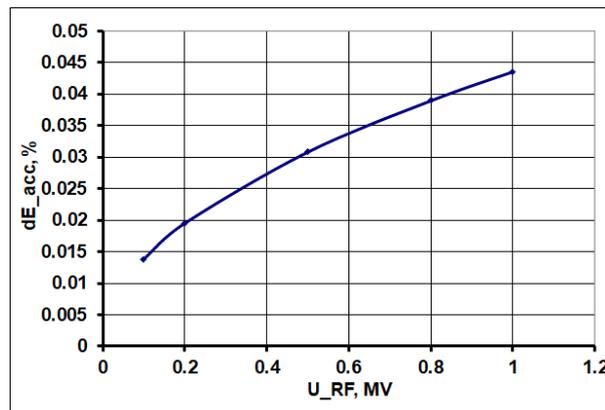
Из-за размера сепаратрисы и наличия радиационных потерь частицы в основном гибнут на внутренней стенке вакуумной камеры в областях с максимальной дисперсионной функцией. Моделирование показывает, что в номинальном режиме работы потери частиц составляют примерно 10% от полного заряда пучка ( $Q_{55} = 15$  нКл), что является приемлемым.

На начальной стадии запуска бустера, когда орбита и оптика еще не настроены хорошо, потери частиц могут достигать 100%. Для уменьшения радиационного фона заряд инжектируемого пучка предполагается уменьшить до 3 нКл. Распределение потерь частиц для этого случая показано на **Рисунке 1.2.6.3**.



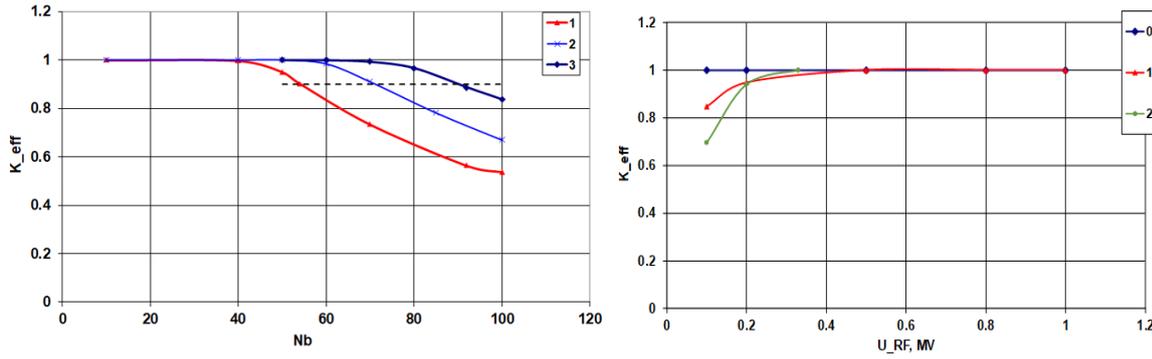
**Рисунок 1.2.6.3.** Потери частиц для первой фазы запуска бустера.

Рассмотрим зависимость эффективности инжекции в синхротрон-бустер от напряжения ускоряющего высокочастотного напряжения. График зависимости относительного энергетического акцептанса (размер сепаратрисы синхротронных колебаний) от напряжения на ускоряющих резонаторах при энергии инжекции 200 МэВ показан на **Рисунке 1.2.6.4**.



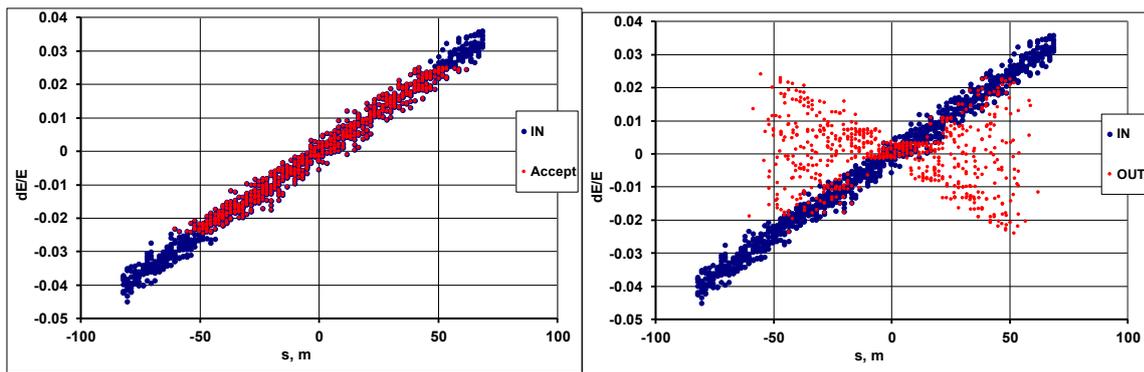
**Рисунок 1.2.6.4.** Зависимость величины сепаратрисы синхротронных колебаний от напряжения на ускоряющих резонаторах на энергии инжекции  $E = 200$  МэВ.

Результаты моделирования эффективности захвата частиц из линейного ускорителя в зависимости от числа сгустков с зарядом 0.3 нКл при разном напряжении на резонаторах показаны на **Рисунке 1.2.6.5**. Подгрузка током пучка структуры линака и увеличение разности энергии между первым и последним сгустками приводит (при фиксированной величине сепаратрисы) к потерям частиц за пределами продольной области устойчивости. Из графиков видно, что при напряжении 200 кВ с эффективностью 90% захватываются 54 сгустка. Для захвата большего цуга необходимо увеличивать напряжение на резонаторах. При этом, однако, сгустки укорачиваются, что может приводить к возникновению коллективных неустойчивостей.



**Рисунок 1.2.6.5.** Слева – эффективность захвата (относительная) в бустер в зависимости от числа сгустков, выпускаемых из линака (обозначения: 1 – напряжение на резонаторах 200 кВ, 2 – 330 кВ, 3 – 500 кВ). Справа – зависимость захвата в бустер для разных случаев, объясняющихся в тексте.

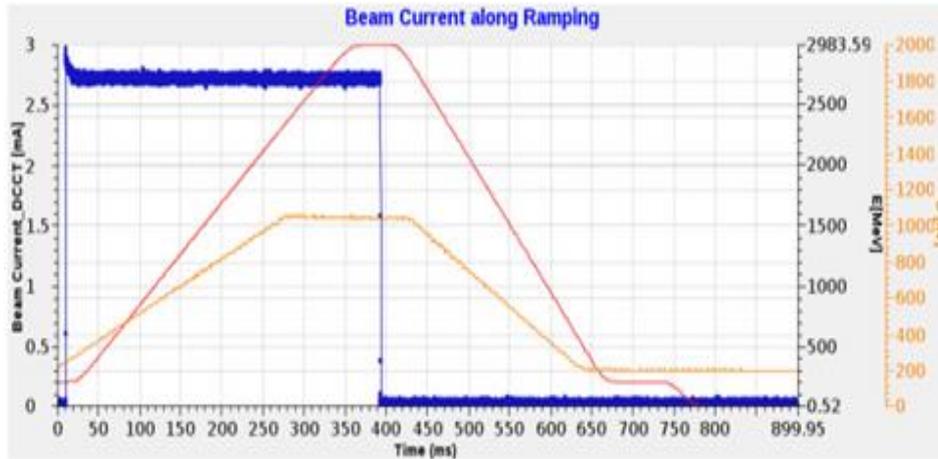
Правый **Рисунок 1.2.6.5** демонстрирует результаты расчета эффективности инжекции для следующих случаев. Кривая, обозначенная «0» показывает инжекцию одного сгустка с малым зарядом 0.3 нКл и энергетическим разбросом 0.24 %; что обеспечивает высокую эффективность захвата при малых напряжениях резонатора (>100кВ). Для кривой «1» заряд впускаемого (одного) сгустка увеличен до 1 нКл, соответственно, энергетический разброс вырос до 1 %, поперечный эмиттанс сгустка  $\epsilon_{x,y} \approx 90$  нм. Чтобы добиться эффективности инжекции около 100%, напряжение ускоряющих резонаторов должно быть  $\geq 500$  кВ. Кривая «2» на **Рисунке 1.2.6.5** соответствует инжекции 55-ти сгустков с зарядом 0.3 нКл в каждом. Сгустки размещаются в каждой второй ВЧ-сепаратрисе бустера (поскольку частота ВЧ-источника электронов в два раза меньше частоты ускоряющей системы синхротрона). Разница энергии между первым и последним сгустками – 4%, эмиттанс впускаемого пучка  $\epsilon_{x,y} \approx 53$  нм. Чтобы получить высокую эффективность инжекции, напряжение ускоряющих резонаторов синхротрона должно быть  $\geq 500$  кВ.



**Рисунок 1.2.5.6.** Движение частиц в продольном фазовом пространстве синхротрона-бустера. Синие точки на обоих графиках – начальное распределение частиц из линака. Красные на правом графике – распределение частиц после 1000 оборотов, на левом графике – проекция «выживших» частиц на начальное распределение.

**Рисунок 1.2.5.6** показывает фазовый портрет продольного движения в синхротроне после инжекции в координатах  $(s, \Delta E/E)$ . Инжектируется 100 сгустков с параметрами из **Таблицы 1.2.6.1**, напряжение на резонаторах 330 кВ, продольный среднеквадратичный размер

сгустка 1 мм, энергетический акцептанс  $(\Delta E/E)_{max} = 2.5\%$ . Для  $\approx 50$  сгустков эффективность захвата превышает 90%.



**Рисунок 1.2.5.7.** Графики изменения энергии синхротрона-бустера NSLS-II во время цикла инжекции (красная трапеция) и тока пучка (синий цвет).

**Рисунок 1.2.5.7** показывает экспериментальные данные инжекционного цикла синхротрона-бустера NSLS-II. Синим цветом показано изменение инжектированного тока во время цикла. Из графика видно, что основные потери тока пучка (около 7%) происходят в начале ускорения на участке  $\approx 200 \div 1000$  МэВ; в дальнейшем потери пучка не превышают 3%.

## 1.2.7 Магнитная система бустера

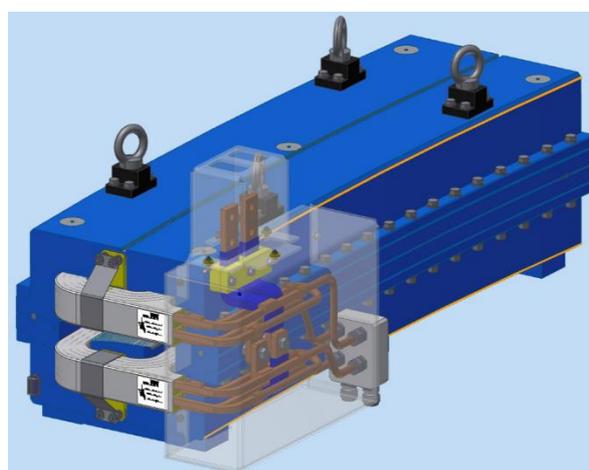
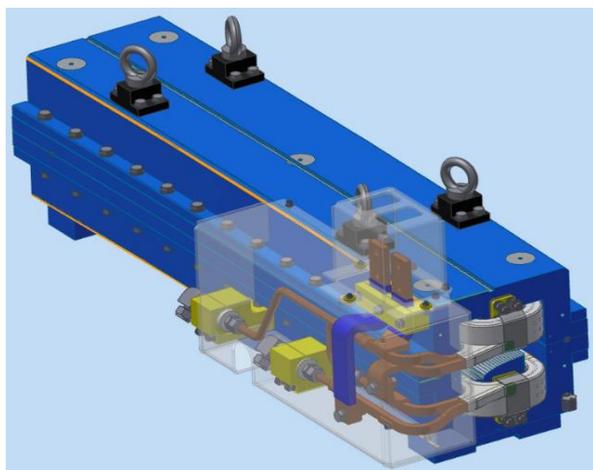
Поворотные магниты синхротрона-бустера содержат, помимо дипольной составляющей поля, квадрупольную (фокусирующую для магнитов BF и дефокусирующую для BD) и секступольную. Качество интегрального магнитного поля выдерживается на уровне  $\Delta B/B_0 \leq \pm 1 \cdot 10^{-3}$  в горизонтальной области  $\Delta x = \pm 2$  см при работе бустера во всем диапазоне энергий от 0.2 ГэВ до 3 ГэВ. Магниты набираются из штампованных с высокой точностью пластин электротехнической стали марки M1200-100A с клеевым покрытием Стаболит-70. Сердечники спекаются из набора идентичных пластин толщиной 1 мм. Пластины сердечника изготовлялись штамповкой, что обеспечивало высокую точность и повторяемость профиля полюса.

Для коррекции интегрального значения поля в зависимости от поперечных координат (учет как влияния собственного краевого поля, так и ошибок поля внутри магнита) используются торцевые фаски. Фаски имеют сложную форму и выполнены под углом к медианной плоскости для BF магнита  $30^\circ$  и для BD  $45^\circ$ . Параметры магнитов представлены в **Таблице 1.2.7.1**, их внешний вид показан на **Рисунках 1.2.7.1 и 1.2.7.2**.

В кольце синхротрона имеется 24 квадрупольных и 16 секступольных линз, **Рисунок 1.2.7.3**. Они достаточно слабые, их влияние на оптику и динамику синхротрона невелико, и их можно рассматривать как элементы-корректоры.

**Таблица 1.2.7.1.** Параметры диполей синхротрона-бустера.

Параметр	BF	BD
Количество	28	32
Эффективная длина поля	1.24 м	1.30 м
Радиус поворота магнита	21.745 м	8.877 м
Угол поворота	3.2673°	8.3911°
Межполюсной зазор	±14 мм	±13 мм
Поле на инжекции	0.0307 Т	0.0751 Т
Поле на выпуске	0.4602 Т	1.1273 Т
Квадруп. компонента $K_1$	0.82 м <sup>-2</sup>	-0.555 м <sup>-2</sup>
Секступ. компонента $K_2$	3.6 м <sup>-3</sup>	-4.3 м <sup>-3</sup>
Область хорошего поля ( $y \times x$ )	±12 × ±20 мм <sup>2</sup>	
Качество поля $\Delta B/B_0$	± 1·10 <sup>-3</sup>	



**Рисунок 1.2.7.1.** Внешний вид дипольных магнитов BF и BD.



**Рисунок 1.2.7.2.** Фотография магнита BD NSLS-II.

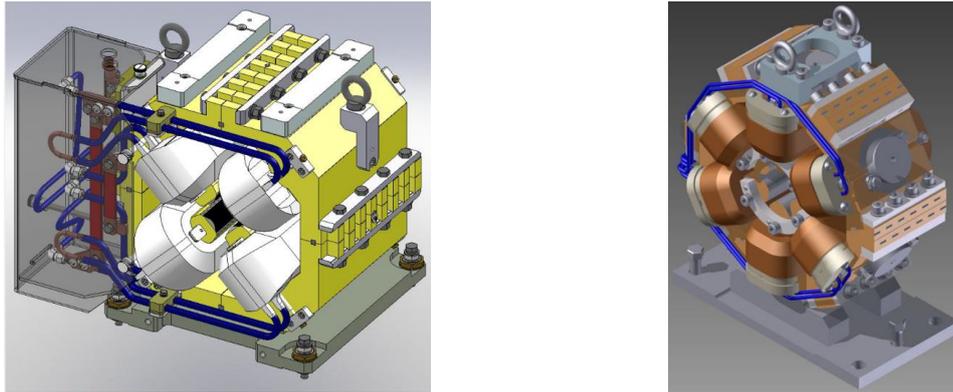


Рисунок 1.2.7.3. Внешний вид квадрупольной (слева) и секступольной (справа) линз.

Таблица 1.2.7.2. Основные параметры квадрупольной и секступольной линз

Параметр	Проект	Модель
<b>Квадрупольная линза</b>		
Количество	24	24
Ток (А)	167	161.269
Длина (м)	0.3	0.30525
G (Т/м)	20.425	20.115
<b>Секступольная линза</b>		
Количество	16	16
Ток (А)	5	5
Длина (м)	0.12	0.12
B'' (Т/м <sup>2</sup> )	400	376.98

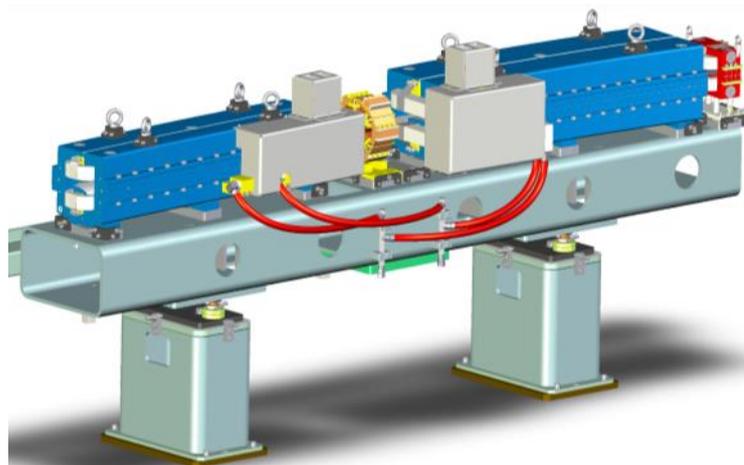


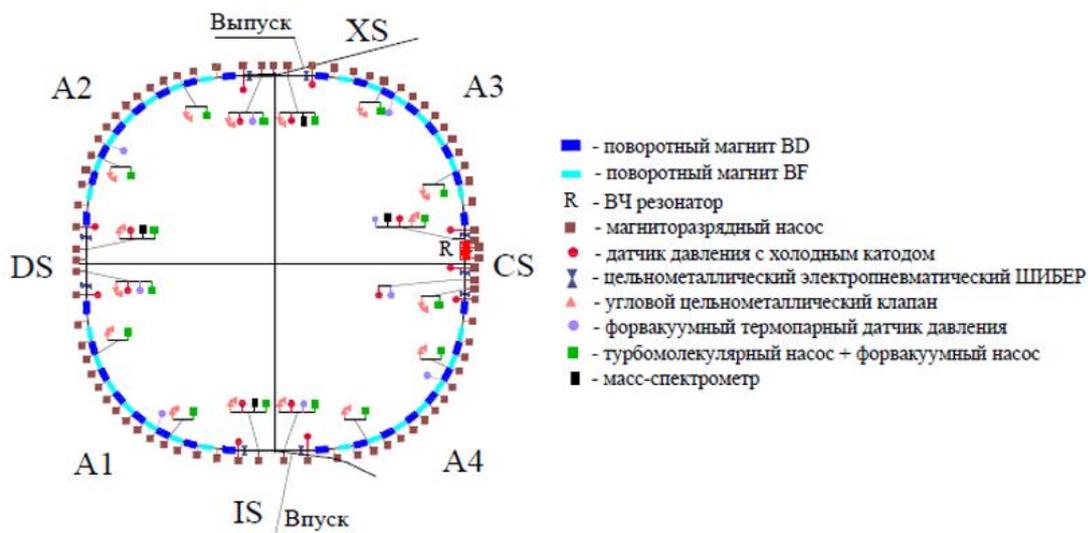
Рисунок 1.2.7.4. Магниты синхротрона-бустера на общей подставке.

Параметры линз приведены в **Таблице 1.2.7.2**. Столбцы «проект» и «модель» обозначают проектное значение и то, которое получилось по результатам магнитных измерений серии магнитных элементов и использовалось для моделирования динамики пучка.

Подставки под сборку магнитов и их опоры (**Рисунок 1.2.7.4**) изготавливаются из прямоугольной стальной трубы сечением  $500 \times 300 \text{ мм}^2$  с толщиной стенки 16 мм. На подставке длиной около 3.5 метров размещаются диполи BF и BD, корректор, секступольная линза и вакуумная камера с датчиками положения пучка. Относительная точность выставки магнитов на подставке лучше  $\pm 50 \text{ мкм}$ . После установки сборки в тоннель при необходимости положение всей подставки слегка корректировалось с помощью подвижек в опорах в диапазоне  $\pm 25 \text{ мм}$ .

## 1.2.8 Вакуумная система бустера

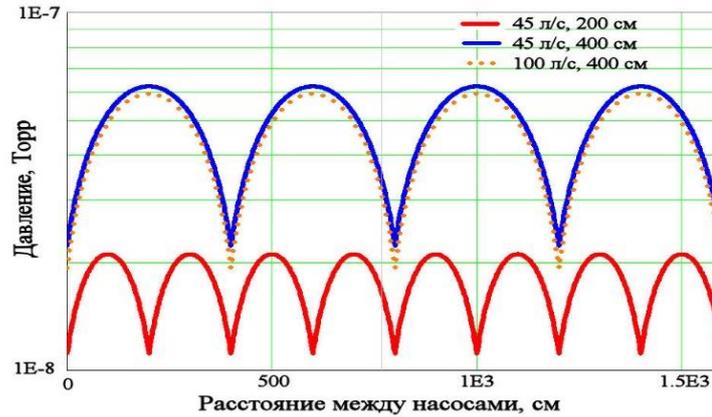
Вакуумная система бустера состоит из четырех суперпериодов, (каждый включает поворотную секцию длиной около 31 м и прямолинейный промежуток длиной 8 м), изолированных друг от друга цельнометаллическими электропневматическими клапанами с временем срабатывания  $\sim 2 \div 3 \text{ с}$ .



**Рисунок 1.2.8.1.** Схема вакуумной системы бустера СКИФ.

Высокий вакуум достигается магнитоотрядными насосами (скорость откачки 45 л/с), расположенными на расстоянии около 2 м друг от друга (15 насосов в поворотных секциях, 6 – в резонаторном промежутке и по 2-3 в остальных прямолинейных промежутках). **Рисунок 1.2.8.1** показывает схему вакуумной системы бустера.

На **Рисунке 1.2.8.2** представлено распределение давления остаточного газа на 16-метровом участке поворотной секции для различного размещения насосов и быстроты их откачки. Так как быстрота откачки определяется размерами пазов в откачных постах, то увеличение быстроты откачки магнитоотрядных насосов с 45 л/с по воздуху до 100 л/с, приводит к увеличению эффективной быстроты откачки всего лишь на 3 л/с. При этом среднее динамическое давление в камере уменьшится на  $9 \div 10 \%$ . С другой стороны, увеличение расстояния между насосами в 2 раза, при быстроте откачки 45 л/с, влечет за собой ухудшения вакуума в 3 раза. Если же увеличить быстроту откачки насосов, при таком расположении, до 100 л/с, динамическое давление улучшится на  $5 \div 7 \%$ .

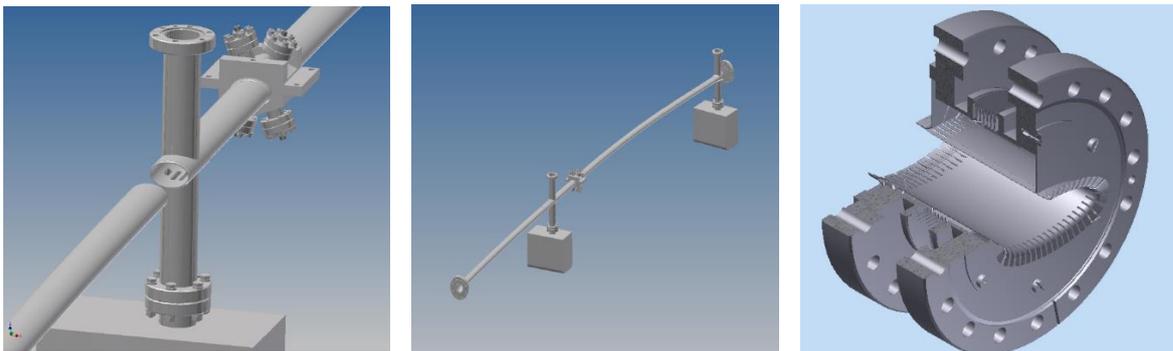


**Рисунок 1.2.8.2.** Распределение давления остаточного газа в поворотной секции. Насосы с быстротой откачки 45 л/с располагаются через 2 м (сплошная красная линия), насосы 45 л/с (синяя линия) и 100 л/с (пунктир) через 4 м

Таким образом, оптимальный результат достигается при использовании насосов с быстротой откачки 45 л/с (по воздуху), расположенных через каждые  $\approx 2 \div 2.3$  м.

Форвакуумная откачка осуществляется через цельнометаллический угловой клапан с помощью безмасляной высоковакуумной откачной станции, состоящей из турбомолекулярного насоса (быстрота откачки по воздуху  $80 \div 100$  л/с) и безмасляного форвакуумного насоса (быстрота откачки  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). В каждом промежутке располагается два клапана для форвакуумной откачки, один форвакуумный датчик и два датчика высокого вакуума. В прямолинейных промежутках также устанавливаются масс-спектрометры.

Для обеспечения необходимого давления и соблюдения электромагнитной «гладкости», порты откачки изготавливаются из сплошной трубы с пазами под откачку с суммарной площадью  $5.2 \text{ см}^2$  (левый **Рисунок 1.2.8.3**). Эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса определяется пазами и составляет 13 л/с.



**Рисунок 1.2.8.3.** Левый рисунок – пикап-электрод и порт откачки с пазами. Средний рисунок – вакуумная камера с насосами одной секции магнитной структуры, показанной на **Рисунке 1.2.7.4**. Правый рисунок – сильфонный узел с апертурой  $62 \times 22$  мм с высокочастотными экранами, обеспечивающими электромагнитную гладкость соединения.

Выбор материала для большинства вакуумных камер бустера обуславливается импульсным режимом работы магнитов. Необходимо использовать материалы с низким удельным сопротивлением, например, нержавеющие марки стали аустенитного класса. В этом случае искажение ведущего магнитного поля является незначительным (величина отклонения варьируется в диапазоне от десятых долей до нескольких процентов, для различных магнитов), что легко компенсируется источниками питания магнитов.

Вакуумная камера в поворотных магнитах, выполненная из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L, представляет собой в поперечном сечении эллипс  $41 \times 24 \text{ мм}^2$  (молекулярная проводимость камеры 3.2 л·м/с). Из-за малого расстояния между магнитами в поворотных секциях, вакуумная камера одной магнитной сборки включает в себя дипольные камеры VD и VF, короткие прямолинейные промежутки для мультипольных магнитов, порты для дополнительного вакуумного оборудования (датчики давления, насосы или клапаны для форвакуумной откачки), сильфоны, пикап-электроды, а также специальные плавные переходы с эллипса на круглые отверстия диаметром 46 мм. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения типа Conflat, соединения вакуумной камеры выполнены аргонно-дуговой сваркой (средний **Рисунок 1.2.8.3**). Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного нагревом, применены сварные сильфонные узлы (правый **Рисунок 1.2.8.3**).

Большинство камер в прямолинейных промежутках имеют эллиптическое сечение  $62 \times 22 \text{ мм}^2$ , с молекулярной проводимостью 4 л·м/с. Толщина стенки камеры 1 мм. Вакуумная камера впускных/выпускных магнитов имеет форму эллипса с внутренней апертурой  $60.3 \times 21 \text{ мм}^2$ . Толщина стенки 0.5 мм, а для механической прочности на камере припаиваются высоко-температурным медно-оловянистым припоем  $\text{CuSn}_{10}$  ребра жесткости из нержавеющей стали 316 LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм.

Камеры септумов состоят из двух частей, основной камеры, по которой циркулирует пучок электронов в бустере, и камеры впуска (для впускного септума), через которую пучок инжектируется в бустер, или камеры выпуска (выпускной септум), через которую пучок выпускается в направлении основного кольца СКИФ. Апертура основных камер впускного и выпускного септумов аналогична апертуре дипольного магнита. Камера впуска имеет диаметр 28 мм (толщина стенки 0.4 мм), в то время как камера выпуска, благодаря более малому размеру пучка электронов, эллипс  $17 \times 15 \text{ мм}^2$  (с толщиной стенки 0.3 мм). С целью сохранения гладкости камеры, а, следовательно, и импеданса, сильфоны в промежутках впуска/выпуска снабжены ВЧ экранами, изготовленными из нержавеющей стали марки 316 LN (правый **Рисунок 1.2.8.3**). Для обеспечения разрыва замкнутого витка в промежутке впуска установлена керамическая камера диаметром 95 мм.

Вакуумные камеры диагностического промежутка, изготовленные из трубы, из нержавеющей стали марки 316 L, имеют апертуру  $\text{Ø}63.5$  с толщиной стенки 1.6 мм. Пикап-электроды в поворотных секциях имеют апертуру аналогичную дипольной вакуумной камере, в прямолинейных промежутках, – эллипс  $62 \times 22 \text{ мм}^2$ .

Следующее оборудование входит в вакуумную систему бустерного синхротрона:

- Вакуумных магниторазрядных насосов НМД – 77.

- Форвакуумных датчиков – 9.
- Высоковакуумных датчиков – 17.
- Масс-спектрометров RGA – 4.
- Шиберов высоковакуумных – 9.
- Клапанов форвакуумной откачки – 16.
- Источников питания магниторазрядных насосов – 36.
- Контроллеров датчиков давления – 7.

Все источники питания вакуумного оборудования и оборудование системы автоматизации для них располагаются в электрических шкафах, каждый из которых объединяет четыре радиостойки. В каждой радиостойке располагается вакуумное оборудование поворотной секции и последующего по направлению движения пучка прямолинейного промежутка.

### 1.2.9 Ускоряющая система бустера

Ускоряющая система бустера работает на той же частоте 357 МГц, что и ускоряющая система основного накопительного кольца СКИФ. Основные компоненты системы (высокочастотные ускоряющие резонаторы с подавлением высших мод и твердотельные ВЧ-генераторы) унифицированы для обеих установок. В **Таблице 1.2.1.1** показаны основные параметры синхротрона, определяющие характеристики высокочастотной ускоряющей системы, для энергии инжекции и выпуска. На энергии выпуска резонаторы бустера должны обеспечить ускоряющее напряжение, равное 1.2 МВ. Мощность радиационных потерь на энергии выпуска при среднем токе пучка 30 мА составляет 20.6 кВт.

Резонаторы имеют  $\Omega$ -образную форму и снабжены тремя сдвоенными волноводами с СВЧ поглотителями в оконечной части для демпфирования высших мод (ВМ), возбуждаемых в резонаторах пролетающими сгустками электронов. Конфигурация резонаторов показана на **Рисунках 1.2.9.1 и 1.2.9.2**.

Количество резонаторов в бустере – 3 шт. Параметры одного резонатора бустера на основной моде приведены в **Таблице 1.2.9.1**.

Основные части резонатора (обечайка с левой торцевой стенкой, правая торцевая стенка, части волноводов для отвода ВМ к поглощающим нагрузкам) изготавливаются из бескислородной меди и соединяются между собой с помощью электронно-лучевой сварки и пайки в вакуумной печи, образуя неразборный корпус. Узлы резонатора (вакуумный насос, датчик вакуума, ввод мощности, датчик напряжения, тюнер основной моды, СВЧ-нагрузки) присоединяются к портам резонатора (круглым или прямоугольным) с помощью металлических уплотнений типа Conflat и HTMS, что позволяет проводить обезгаживающий прогрев резонатора в сборе. Вакуумный ионно-геттерный насос присоединяется к нижнему порту резонатора; для обеспечения откачки в обечайке резонатора выполнены продольные щели, не прерывающие ВЧ-токи основной моды. В стенках резонатора для отвода выделяющегося тепла выполнены каналы водяного охлаждения.

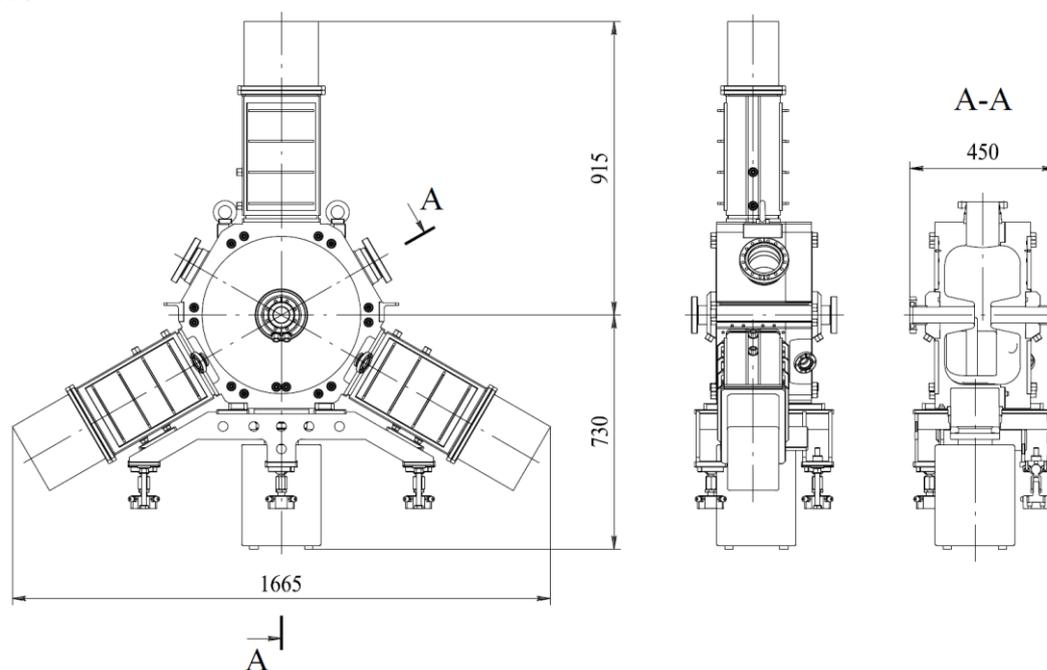


Рисунок 1.2.9.1. Эскиз резонатора с габаритными размерами.

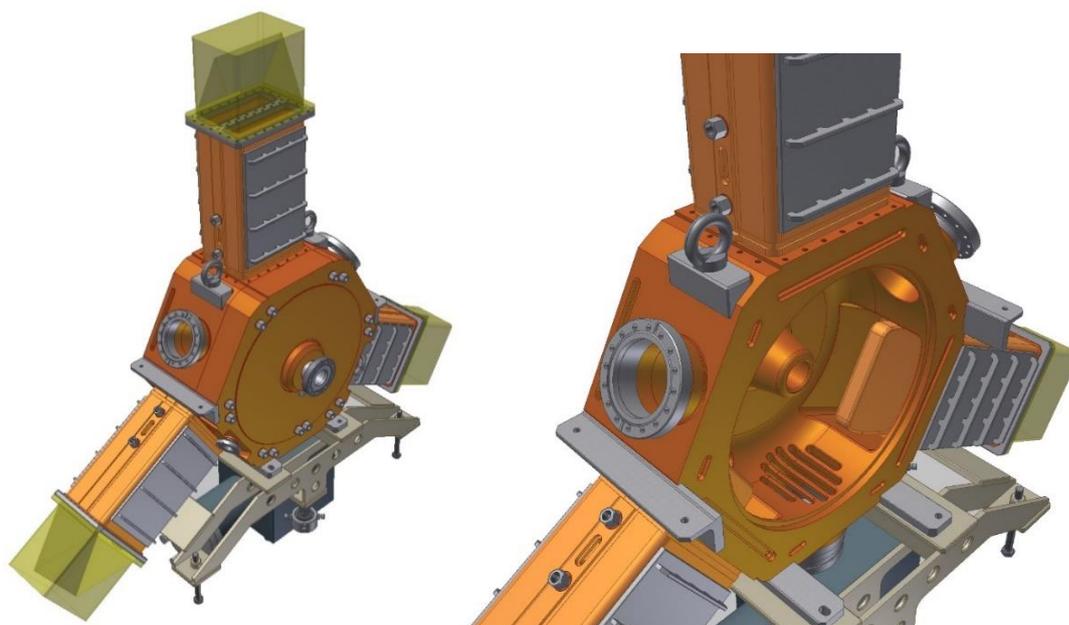


Рисунок 1.2.9.2. 3D-модель резонатора: слева – в сборе, справа – без торцевой стенки.

Как видно из **Таблицы 1.2.9.1**, для питания одного резонатора бустера требуется ВЧ-усилитель с выходной мощностью не менее 40 кВт (с учетом потерь ~5% в линии передачи). Для повышения долговременной надежности работы используются твердотельные (транзисторные) усилители, рассчитанные на максимальную выходную мощность 50 кВт. Усилители строятся на базе телевизионных передатчиков новосибирского предприятия ООО «Триада-ТВ» [15] серии «Полярис» [16], имеющей многолетнюю историю производства и эксплуатации. Конструкция является модульной, с параллельным усилением непрерывного сигнала транзисторными усилительными блоками и последующим суммированием мощностей. Усилители

работают в режиме линейного усиления моногармонического ВЧ сигнала рабочей частоты в непрерывном режиме (CW).

**Таблица 1.2.9.1.** Параметры резонатора на основной моде.

Рабочая частота $f_0$ , МГц	357
Диапазон перестройки частоты $\Delta f$ , МГц	1
Собственная добротность $0.7Q_0$ 3D-model	17 000
Характеристическое пролетное сопротивление $R/Q$ , Ом	150
Шунтовое пролетное сопротивление $R$ , Ом	2.55
Амплитуда ускоряющего напряжения на энергии выпуска $V_m$ , кВ	400
Мощность потерь в стенках на энергии выпуска $P$ , кВт	31.4
Макс.плотность мощности потерь на энергии выпуска $p_{max}$ , Вт/см <sup>2</sup>	15.7
Мощность, передаваемая в пучок для комп.рад. потерь на выпуске $P_b$ , кВт	6.9

Ключевыми особенностями усилителей основного кольца и бустера являются:

- Наличие циркулятора на выходе каждого транзистора.
- Полностью врубное (без фиксации соединений замковыми устройствами) исполнение усилителей.
- Полностью жидкостное охлаждение всех элементов.
- Полностью припаянные транзисторы.
- Отсутствие высоконагруженных элементов.
- Возможность свободного размещения усилительных стоек.
- Контроль выходной мощности каждой стойки.
- Возможность управления напряжением питания оконечных каскадов.
- Быстрая защита по отраженной мощности.
- Возможность долговременной работы на полностью отражающую нагрузку при любой фазе коэффициента отражения.
- Дистанционный контроль и управление (web, SNMP).

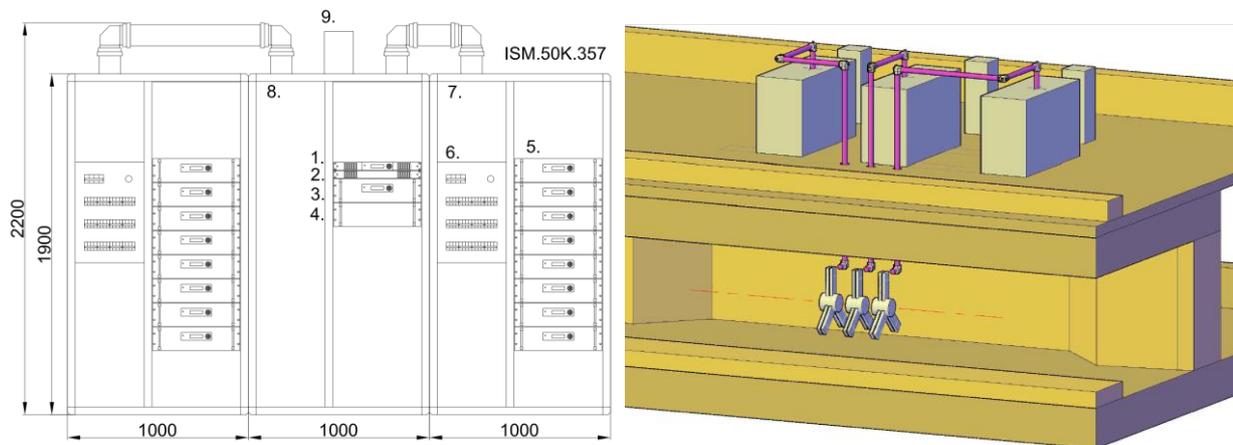
В **Таблице 1.2.9.2** приведены основные характеристики усилителя бустера.

На **Рисунке 1.2.9.3** приведен эскиз усилителя ВЧ питания бустера СКИФ. Входной ВЧ сигнал усиливается до мощности 800-1000 Вт предварительным усилителем и несколько раз делится, распределяясь сначала по 2-м усилительным стойкам, затем по 8-ми усилительным кассетам в каждой стойке, затем по 6-ти усилительным ячейкам в каждой кассете. В ячейке применяется современный sdвоенный транзистор BLF184XR. Транзистор имеет симметричное возбуждение и работает в классе АВ. Напряжение питания транзистора составляет 50 В, может регулироваться дистанционно, в пределах от 10 до 50 В. Регулировка напряжения позволяет увеличить КПД при работе усилителя в разных режимах. После усиления транзисторными ячейками происходит сложение усиленных сигналов по аналогичной делению схеме.

Резонаторы в бустере размещены в пределах одного прямолинейного промежутка. ВЧ-мощность передается от усилителей к резонаторам по коаксиальным фидерам. Схема размещения резонаторов и усилителей показана на **Рисунке 1.2.9.3** справа.

**Таблица 1.2.9.2.** Основные технические характеристики усилителя мощности для ВЧ питания ускоряющего резонатора бустера.

Рабочая частота	355÷359 МГц
Максимальная выходная мощность	50 кВт CW
Выходной разъем	EIA 4 1/2", 50 Ом
Входная мощность	4 Вт
Входной разъем	SMA, 50 Ом
Усиление	41 дБ
Компрессия усиления	1 дБ при 50 кВт
Электропитание	400 В, 50 Гц, 2 ввода
Потребляемая мощность	100 кВт
Тепловыделение	50 кВт при КВСН <1.1 >100 кВт при КВСН >10
Охлаждение	Водяное, 95 л/мин
Перепад давления «Вход-Выход»	до 1.5 бар
Разница температур «Выход-Вход»	6°С при КВСН <1.1 >12°С при КВСН >10
Габариты ГхШхВ	1200×3000×2200 мм
Вес	≈1800 кг, ≈500 кг/м <sup>2</sup>
Диапазон рабочих температур окр.среды	+5÷+45°С



**Рисунок 1.2.9.3.** Слева – эскиз усилителя ВЧ питания ускоряющего резонатора бустера (вид спереди). Обозначения: 1 – блок управления, 2 – блок дистанционного контроля СДК-5, 3 – предварительный усилитель 850 Вт, 4 – делитель на 2, 5 – усилитель мощности 3.6 кВт, 6 – распределительный щит, 7 – стойка с усилителями, 8 – стойка с выходным сумматором, 9 – рефлектометр на 4 зонда. Справа – схема размещения резонаторов и усилителей мощности бустера: внизу – резонаторы в радиационно-защищенном туннеле, вверху – усилители мощности и стойки управления в генераторном зале.

### 1.2.10 Система питания магнитных элементов бустера

Источники питания магнитов бустера работают в импульсном режиме с частотой повторения 1 Гц и, кроме источников корректоров и секступолей, являются однополярными. Форма импульса тока источников питания должна соответствовать графикам **Рисунка 1.2.1.4**. Диапазон изменения энергии ускоряемых пучков составляет 15 раз. Частоты синхротронных колебаний во время ускорения меняются от 20.9 кГц до 30.8 кГц, диктуя малый уровень шумов в этом диапазоне. Из-за большого времени затухания колебаний и размера пучка (особенно на инжекции) требования на стабильность/точность отработки заданной формы сигнала источниками питания высоки. Основные параметры магнитов синхротрона-бустера представлены в **Таблице 1.2.10.1**.

**Таблица 1.2.10.1.** Параметров магнитов синхротрона-бустера.

Тип	№	$I_{max}$ , А	R, мОм	L, мГн	$U_R$ , В	$U_L$ , В	$U_{tot}$ , В	P, кВА
BR-BF	28	862	3.8	1.1	91.7	95.2	187	161.1
BR-BD	32	742	19.5	9.6	463	816.6	1280	94.4
BR-QF	8	167	30	16	48.8	91.2	140	23.4
BR-QD	8	118	30	16	34.4	64.8	100	11.8
BR-QG	8	105	30	16	31.2	56.8	88	9.2
BR-SXV	8	5.6	1200	104	6.7	10	16.7	0.75
BR-SXH	8	5.6	1200	104	6.7	10	16.7	0.75
BR-CX	20	5	2000	4000	10	40	50	5
BR-CY	16	5	2000	2500	10	25	35	1.9
Септум	1	430	18	25	8	-	8	3.4

**Таблица 1.2.10.2.** Источники питания магнитов бустерного кольца.

ИП	Число	$I_{max}$ , А	$U_R$ , V	$U_{Total}$ , V	$P_{tot}$ , KVA
BR-BF	1	900	82.0	200	180
BR-BD	2	750	220	700	1050
BR-QF	1	167	48,8	160	25.6
BR-QD	1	118	34,4	160	25.6
BR-QG	1	105	31,2	160	25.6
BR-SXV	8	6	6,7	60	2.88
BR-SXH	8	6	6,7	60	2.88
BR-CX	20	6	10	60	7.2
BR-CY	16	6	10	60	5.76
DC Septum	1	500	8	12	6
<b>Всего ИП</b>	<b>59</b>	<b>Мощность:</b>			<b>1331.52</b>

В таблице приведены пиковые значения активного  $U_R$  и реактивного  $U_L$  напряжения в течение времени ускорения 0.26 с. Общая пиковая потребляемая мощность магнитов бустера  $P_M \approx 1.2$  МВА.

Магнитная система имеет 59 источников питания (ИП) с общей пиковой потребляемой мощностью около 1.2 МВА. Время ускорения составляет 0.26 с, при частоте повторения 1 Гц. Ток источников питания синхронно перестраивается во время ускорения пучка. Нет требований по синхронизации на спадающую часть профиля тока источников питания. В **Таблице 1.2.10.2** приведен список ИП.

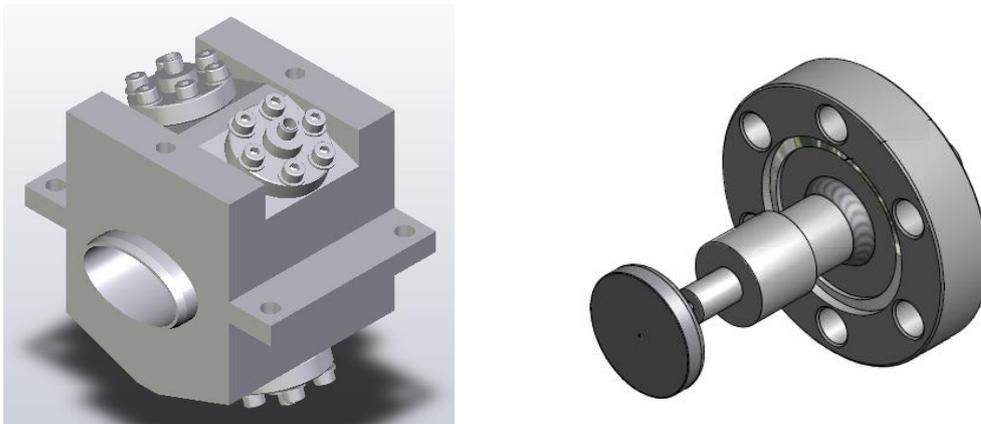
### 1.2.11 Система диагностики параметров пучка

Состав и функции системы диагностики пучка бустера приведены в **Таблице 1.2.11.1**.

**Таблица 1.2.11.1.** Состав и функции системы диагностики бустера.

Датчик	Кол-во	Функция
Датчик положения пучка	37	Измерение орбиты пучка
Токовый датчик DCCT	1	Измерение среднего тока пучка
Быстрый токовый датчик FCT	1	Измерение абсолютного значения заряда пучка
Полосковая линия	1	Измерение бетатронных частот
Люминофорный датчик	6	Измерение положения и поперечной формы пучка
Датчик радиационных потерь	1	Локализация потерь пучка

**Измерение орбиты пучка в бустере** осуществляется электростатическими датчиками или пикап-электродами (пикапами). В каждом квадранте бустера установлено 9 пикапов. Еще один пикап будет установлен после выпускного магнита. Таким образом, общее количество пикапов в бустере предполагается 37 шт. Конструкция пикапа показана на **Рисунке 1.2.11.1**.



**Рисунок 1.2.11.1.** Слева – пикап в сборке, справа – вакуумный ввод.

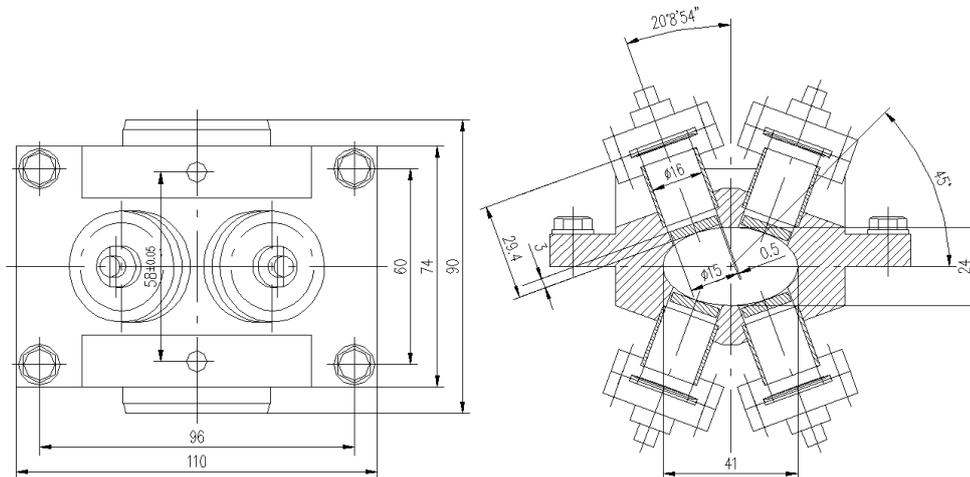
Круглые электроды пикапа имеют диаметр 15 мм и привариваются к вакуумному вводу, который оканчивается разъемом типа SMA. В пикапах используются вакуумные вводы с уже готовыми фланцами, которые затем прикручиваются к корпусу пикапа. Волновое сопротивление каждого ввода 50 Ом. В арках и после выпускного магнита вакуумная камера, где будут установлены пикапы, эллиптического сечения 41×24 мм с электродами, расположенными под углом 45° к горизонтальной плоскости. Всего таких пикапов будет 29 – по 7 шт. в каждой арке и один после выпускного магнита. В прямолинейных промежутках камера пика-

пов эллиптического сечения  $62 \times 22$  мм с электродами, расположенными под углом  $37^\circ$  к горизонтальной плоскости. Всего таких пикапов будет 8 – по 2 шт. в каждом промежутке. На **Рисунках 1.2.11.2 и 1.2.11.3** приведены чертежи пикапов бустера обоих типов.

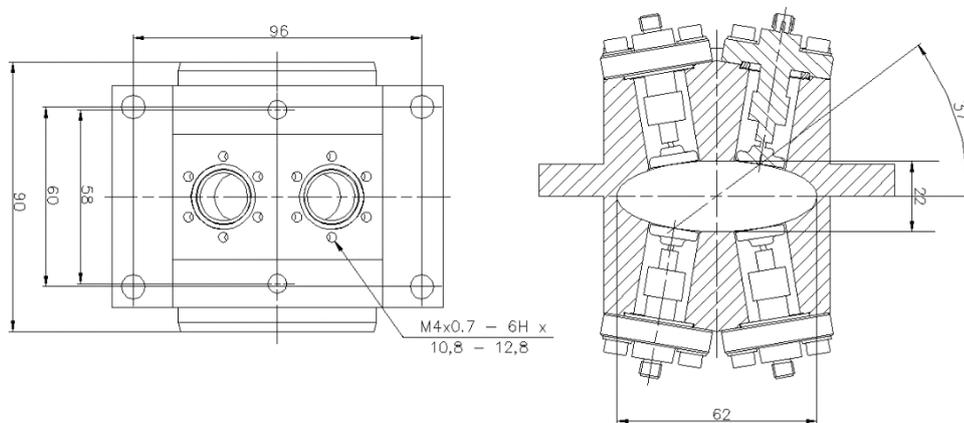
Для компенсации нелинейности сигнала на электродах от положения пучка на измерительном стенде для каждого пикапа снимается координатная сетка (на основе измерений сигналов с электродов для каждого положения калибровочного стержня) и вычисляются коэффициенты полинома для расчета координат пучка.

Электроника пикапов будет обеспечивать

- пооборотные измерения положения пучка для всего времени циклов накопления и подъема энергии с разрешением лучше 30 мкм (при токе более 1 мА)
- измерения орбиты пучка с частотой  $\sim 10$  кГц с относительной точностью лучше 10 мкм (при токе более 1 мА);
- измерения первого оборота при инжекции в бустер.

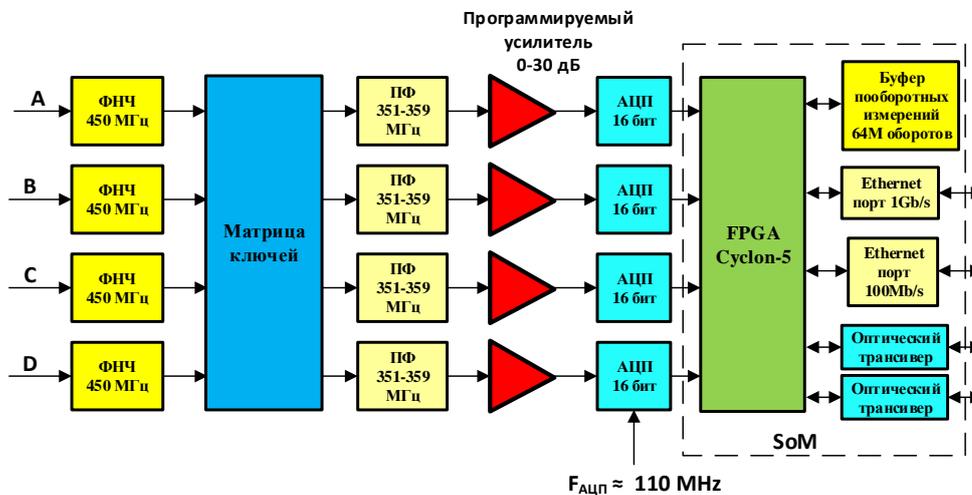


**Рисунок 1.2.11.2.** Пикап для установки в дугах и на выпуске.



**Рисунок 1.2.11.3.** Пикап для установки в прямолинейных промежутках.

Блок-схема прототипа модуля электроники показана на **Рисунке 1.2.11.4**. Из сигнала с пикапа выделяется гармоника с частотой ВЧ  $\sim 357$  МГц, которая далее после преобразования в цифровой вид 16-разрядным АЦП детектируется в FPGA. Матрица ключей соединяет каждый из 4-х аналоговых каналов с каждым из электродов пикапа, что минимизирует погрешность измерений, возникающей из-за неодинаковости и нестабильности коэффициентов передач каналов. Ключи переключаются с частотой  $\sim 10$  кГц, с такой же частотой выполняются измерения положения пучка. После перепуска пучка из блока прочитывается массив координат пучка, охватывающий по времени все фазы цикла работы бустера. Дискретность массива по времени составляет  $\sim 100$  мс. По окончании каждого цикла работы бустера мы будем иметь измеренное положение пучка за каждый оборот – от инжекции до выпуска. Ожидаемая относительная точность измерений положения пучка при времени одного измерения  $\sim 100$  мс лучше  $2$  мкм при токе пучка более  $5$  мА.



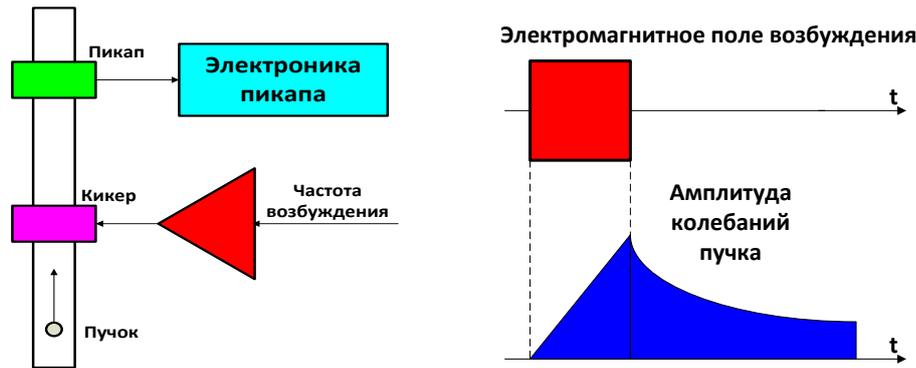
**Рисунок 1.2.11.4.** Блок-схема прототипа блока электроники пикапа бустера.

Каждый блок электроники для одного пикапа представляет собой модуль «евромеханики» высотой 1U, включаемый в сеть питания 220 В. Модуль подсоединяется к сети Ethernet 1 Гбит/сек для управления и считывания результатов измерения. Вся электроника пикапов будет размещена в двух стойках «евромеханики». В каждой стойке будет находиться блок распределения синхросигналов, который будет в оптическом виде получать синхросигналы (импульс «нулевой сепаратрисы», частоту обращения, сигнал «впуск») и в электрическом виде выдавать эти синхросигналы в каждый блок электроники пикапов.

От каждой стойки к пикапам будут протянуты кабели типа LMR-240 и LMR-400. Кабель LMR-400 с затуханием около 8 дБ/100м для частоты 357 МГц будет использован для кабелей длиной  $>50$  м. Кабель LMR-240 с затуханием около 16 дБ/100м для частоты 357 МГц будет использован для кабелей длиной  $<50$  м.

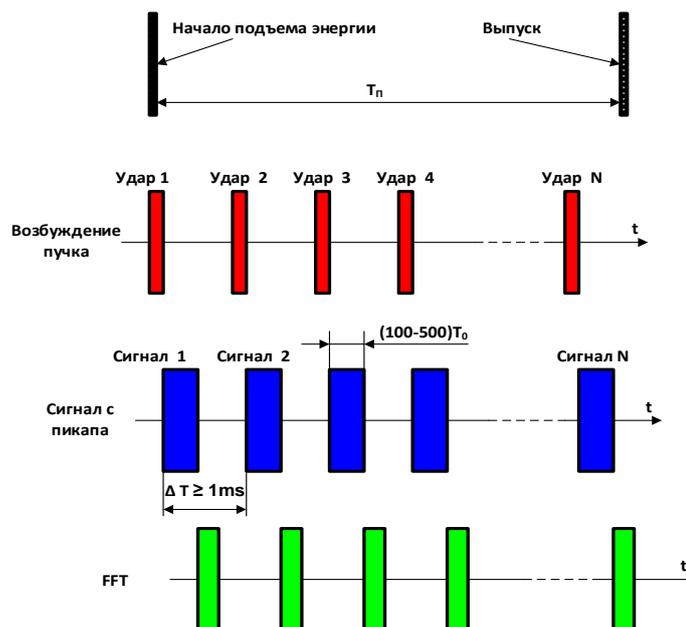
Система измерения орбиты пучка позволяет определять и бетатронные частоты (дробные части) через спектр Фурье остаточных колебаний пучка. Однако во время цикла ускорения будет использоваться отдельная **система измерения бетатронных частот** на основе резонансного возбуждения колебаний пучка. Принцип работы системы показан на **Рисунке 1.2.11.5**.

Пикап и кикер представляют собой 50-омные согласованные полосковые линии. На кикер подается радиочастотный (РЧ) импульс возбуждения с частотой  $F_{рч}$ , близкой к частоте  $F_B = (1+v_{x,y})F_0$ , где  $F_0$  – частота обращения,  $v_{x,y}$  – дробная часть горизонтальной (вертикальной) бетатронной частоты. Длительность РЧ импульса  $\Delta T_{рч}$  составляет  $(100-500)T_0$ , где  $T_0$  – период обращения пучка. По окончании РЧ импульса пучок совершает затухающие бетатронные колебания, которые регистрируются пикапом. Амплитуда колебаний будет достаточна, если разница частот  $F_{рч}$  и  $F_B$  будет менее  $0.5/\Delta T_{рч}$ .



**Рисунок 1.2.11.5.** Принцип работы системы измерения бетатронных частот бустера: слева – схема системы, справа – временная диаграмма.

Электроника пикапа по спектру этих колебаний вычисляет дробную часть горизонтальной (или вертикальной) бетатронной частоты и корректирует частоту возбуждения  $F_{рч}$ . Минимальное время одного измерения составляет около 1 мс. Таким образом, мы имеем следящую систему, в которой частота возбуждения пучка следует за измеренной бетатронной частотой. Точность измерений бетатронной частоты составляет порядка  $10^{-4} F_0$ . Количество измерений за время подъема энергии пучка может составлять несколько сотен. Процесс измерения бетатронных частот во время подъема энергии  $T_{п}$  показан на **Рисунке 1.2.11.6**.

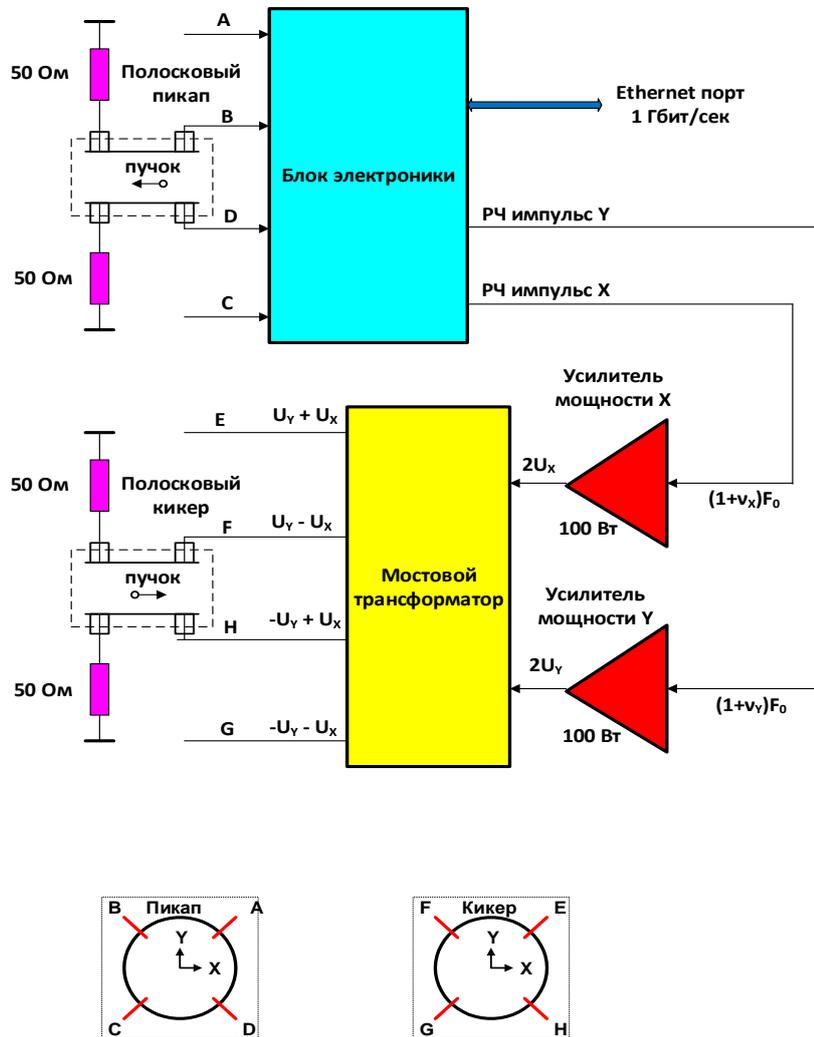


**Рисунок 1.2.11.6.** Процесс измерения бетатронных частот во время подъема энергии бустера.

Возможны два режима работы системы измерения бетатронных частот: когда измеряется либо горизонтальная, либо вертикальная частота, и когда измеряются обе. В последнем случае горизонтальный и вертикальный «удары» кикера по пучку меняются последовательно в каждом следующем такте.

Структурная схема системы измерения бетатронных частот в бустере представлена на **Рисунке 1.2.11.7**. Блок электроники обрабатывает сигналы с пикапа, включая Фурье-преобразование и вычисление бетатронных частот, а также формирует РЧ импульсы, которые после усиления усилителями мощности подаются на пластины кикера.

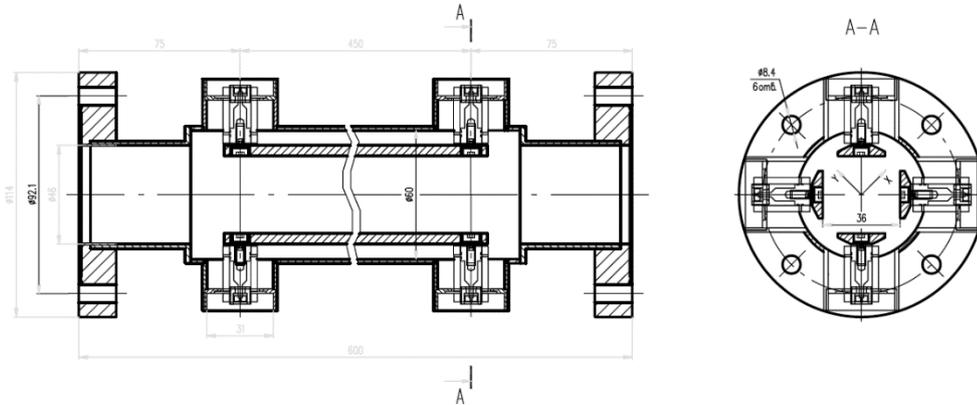
Подавая импульс возбуждения либо на вход усилителя мощности X, либо на вход усилителя мощности Y, мы создаем внутри кикера электромагнитное поле, возбуждающее горизонтальные либо вертикальные бетатронные колебания.



**Рисунок 1.2.11.7.** Структурная схема системы измерения бетатронных частот в бустере.

Пикап и кикер идентичны и состоят из 4-х электродов в виде пластин, восьми вакуумных вводов и корпуса. Чертеж пикапа (кикера) представлен на **Рисунке 1.2.11.8**. Электроды представляют собой полосковые 50-омные линии, на обоих концах прикрепленные к вакуумным вводам типа SMA. Электроды расположены под углом  $45^\circ$  к горизонтальной плоскости.

Длина электродов  $\sim 210$  мм, что составляет  $\lambda/4$  ( $\lambda$  – длина волны) на частоте 357 МГц. С точки зрения чувствительности пикап с такой длиной электродов будет оптимален на частотах 357 МГц, 714 МГц и т.д.



**Рисунок 1.2.11.8.** Чертеж пикапа (кикера) системы измерения бетатронных частот бустера.

Ожидаемая амплитуда сигнала гармоники 357 МГц на выходе пикапа, нагруженного на 50 Ом, составляет около 300 мВ при общем заряде пучка в Бустере 15 нКл.

**Оптическая диагностика пучка (ОДП)** бустера источника СИ СКИФ действует всех этапах работы бустера: при инжекции пучка в бустер из линейного ускорителя, при ускорении пучка в бустере, во время инжекции из бустера в СКИФ. ОДП предназначена для измерения поперечных и продольных размеров пучка в бустере с использованием СИ из поворотных магнитов, и может делать

- измерение продольного профиля заданного сгустка пучка с относительной точностью не хуже 5 процентов,
- измерение поперечных размеров пучка во всех перечисленных режимах работы ускорителя,
- контроль изменения поперечного профиля пучка в процессе подъема энергии.

Измерения производятся путем регистрации оптической части спектра синхротронного излучения, испускаемого пучком в дипольных поворотных магнитах. Свет выходит из вакуумной камеры сквозь высоковакуумное оптическое окно, отразившись от неохлаждаемого медного зеркала. Предусмотрены две точки для вывода оптической части СИ из вакуумной камеры, выбранные из соображений максимального вертикального размера пучка и достаточного места между соседними магнитами (**Рисунок 1.2.11.9**).

Схема вывода СИ показана на **Рисунке 1.2.11.10**.

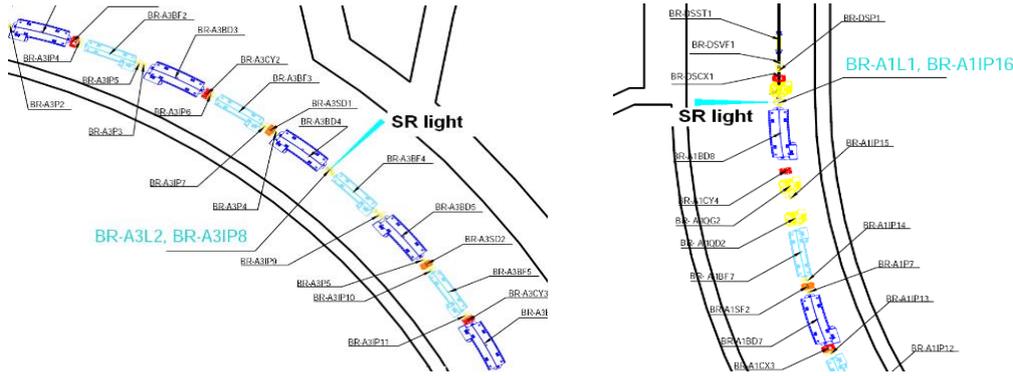


Рисунок 1.2.11.9. Расположение мест вывода СИ из вакуумной камеры бустера.

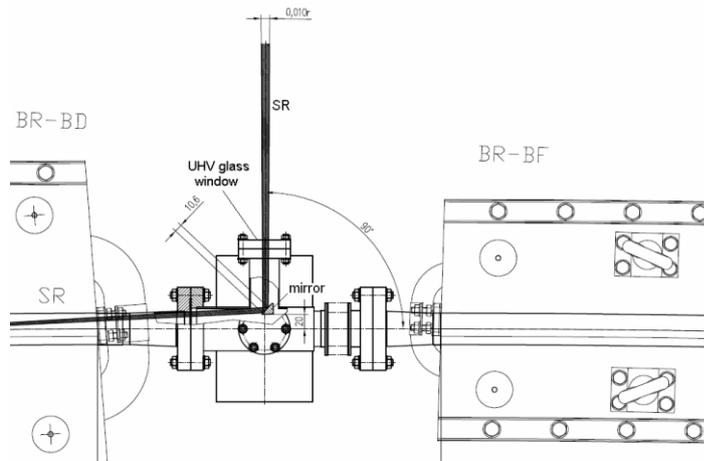


Рисунок 1.2.11.10. Схема вывода СИ из вакуумной камеры в промежутке между магнитами.

Параметры пучка в местах вывода СИ для оптической диагностики бустера СКИФ приведены в Таблице 1.2.11.2 (энергия пучка 3 ГэВ, горизонтальный эмиттанс 37.4 нм, коэффициент бетатронной связи 4%).

Таблица 1.2.11.2. Параметры пучка в точках вывода СИ.

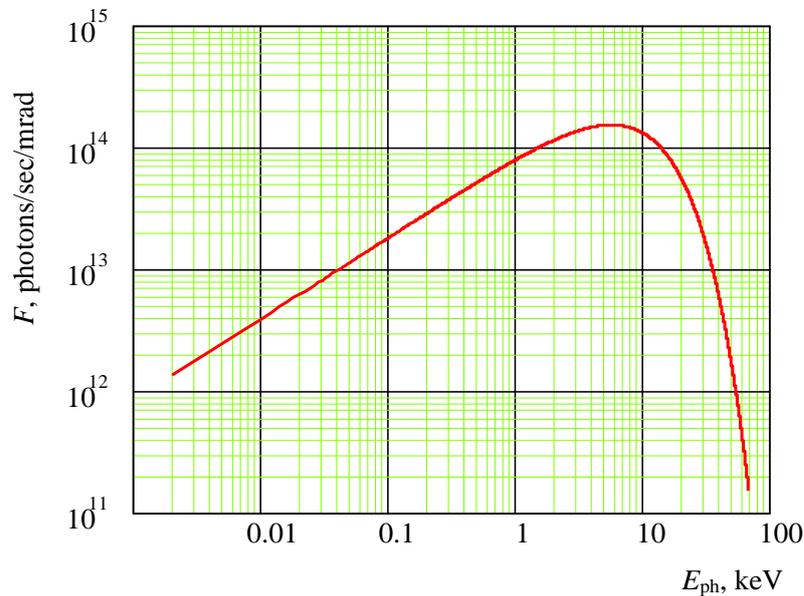
Точка	$\beta_x$ , м	$\beta_y$ , м	$\eta_x$ , см	$\sigma_x$ , мм	$\sigma_y$ , мм
1	1.2	6.8	18	0.26	0.1
2	1.9	25.7	7	0.27	0.2

Вычисленные параметры синхротронного излучения при энергии пучка  $E = 3$  ГэВ, токе  $I = 1$  мА, радиусе поворота магнита бустера  $\rho = 8.877$  м:

- - Минимальная угловая расходимость СИ  $\theta = 1/\gamma = 1.7 \cdot 10^{-4}$  rad ;
- - Угловая расходимость СИ в видимом диапазоне при длине волны света  $\lambda = 5000 \text{ \AA}$  равна  $\theta_{opt} \approx 0.62(\lambda/\rho)^{\frac{1}{3}} \approx 2.38 \cdot 10^{-3}$  рад;
- - Угол раствора СИ в горизонтальной плоскости  $\theta_r = 10.8$  мрад;
- - Критическая энергия излучения  $E_c \approx 5.59\rho/E^3 = 6.75$  кэВ;
- - Оптическое разрешение в вертикальном направлении  $d_y \approx \lambda/(2\pi\theta_{opt}) \approx 0.034$  мм;
- - Оптическое разрешение в горизонтальном направлении  $d_x \approx 0.5\rho\theta_{opt}^2 \approx 0.025$  мм.

Ширина вертикального пятна СИ на полувысоте распределения (FWHM) на медном зеркале, расположенном на расстоянии  $L = 712$  мм от точки излучения, равна  $d_h \approx 2.36 \cdot \theta \cdot L \approx 0.285$  мм для СИ с длиной волны  $\lambda \approx \lambda_c$ . Этот же размер равен  $d_s \approx 4$  мм для СИ в видимой области. Вертикальный размер зеркал составляет 24 мм, максимальное допустимое отклонение пучка в точке излучения равно  $\pm 12$  мм для вертикальной координаты,  $\pm 16$  мрад для вертикального угла и  $\pm 3.5$  мм для радиальной координаты.

Спектр СИ из поворотного магнита бустера ВД для энергии пучка  $E = 3000$  МэВ и тока  $I = 1$  мА показан на **Рисунке 1.2.11.11**. Мощность СИ, испускаемая в один миллирадиан, равна 0.42 Вт, что соответствует полной мощности 4.54 Вт. Плотность мощности на первом зеркале, расположенном внутри вакуумной камеры ускорителя равна приблизительно  $60$  Вт/см<sup>2</sup>, поэтому тепловая нагрузка при токе пучка в 20 мА будет весьма велика. Вследствие этого зеркало должно быть охлаждаемым.

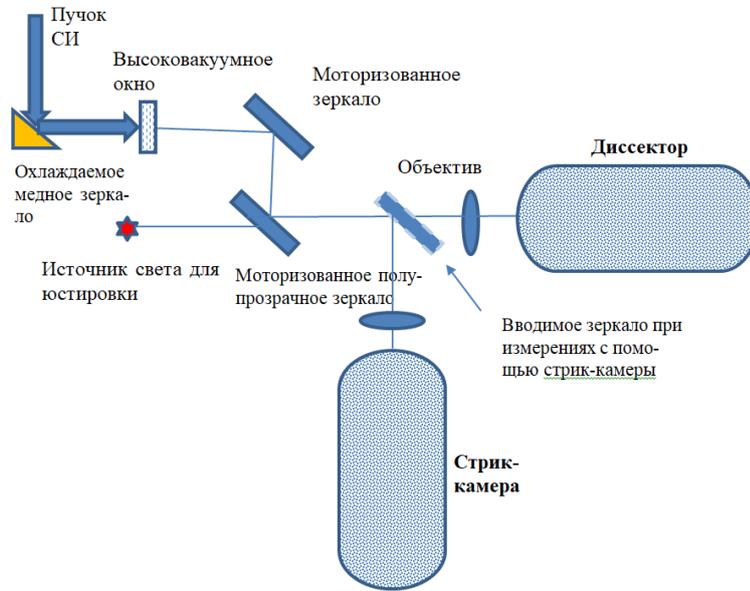


**Рисунок 1.2.11.11.** Спектр СИ из дипольного магнита бустера ВД (полоса 0.1 %).

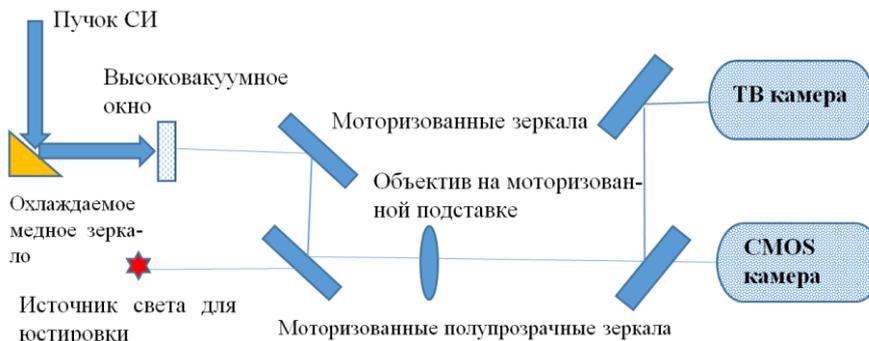
Для упрощения оптической схемы и удобства в обслуживании каждое из мест вывода СИ решает свои задачи по измерению параметров пучка. Свет из первого порта вывода СИ предназначен для измерения продольного профиля сгустков при помощи электронно-оптического диссектора. Свет из второго порта служит для измерения поперечных размеров пучка и наблюдения за поперечным профилем пучка при помощи телекамеры. Обе диагностических системы находятся внутри тоннеля бустера. В связи с этим оптическая схема диагностик содержит приспособления для удаленной юстировки.

Для измерения продольного профиля сгустка используется электронно-оптический диссектор [17], работающий на высокой гармонике частоты обращения пучка. Оптическая схема диагностики продольного профиля сгустка электронов показана на **Рисунке 1.2.11.12**. В связи с тем, что вносить существенные изменения в конструкцию вакуумной камеры бустера нежелательно, оптический источник для юстировки диссектора будет размещаться снаружи вакуумного окна.

Угловое и пространственное оптическое разрешение по вертикали и горизонтали, определяемое свойствами СИ, позволяет ограничиться использованием проекционной оптики при измерениях поперечного размера пучка. Оптическая схема диагностики приведена на **Рисунке 1.2.11.13**. Для регистрации изображения пучка предлагается использовать CMOS камеру UI-5240SE с матрицей 1280×1024 (1.3 МП) и гигабитным Ethernet интерфейсом.



**Рисунок 1.2.11.12.** Оптическая схема измерения продольного размера сгустка с помощью электронно-оптического диссектора и стрик-камеры.



**Рисунок 1.2.11.13.** Оптическая схема измерения поперечных размеров пучка.



**Рисунок 1.2.11.14.** Внешний вид CMOS камеры UI-5240SE.

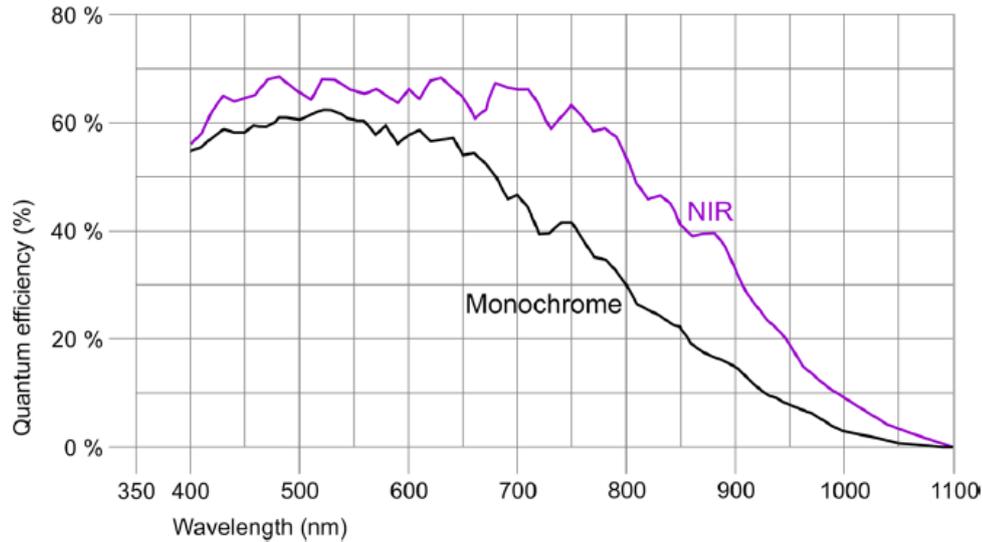


Рисунок 1.2.11.15. Спектральная чувствительность камеры.

Таблица 1.2.11.3. Параметры сенсора камеры.

Sensor type	CMOS Mono
Shutter	Global Shutter / Rolling shutter / Global Start Shutter
Sensor characteristic	Linear
Readout mode	Progressive scan
Pixel Class	SXGA
Resolution	1.31 Mpix
Resolution (h x v)	1280 x 1024 Pixel
Aspect ratio	5:4
ADC	10 bit
Color depth (camera)	12 bit
Optical sensor class	1/1.8"
Optical Size	6.784 mm x 5.427 mm
Optical sensor diagonal	8.69 mm (1/1.84")
Pixel size	5.3 $\mu$ m
Manufacturer	e2v
Sensor Model	EV76C560ABT
Gain (master/RGB)	4x/-
AOI horizontal	same frame rate
AOI vertical	increased frame rate
AOI image width / step width	16 / 4
AOI image height / step width	4 / 2
AOI position grid (horizontal/vertical)	2 / 2
Binning horizontal	same frame rate
Binning vertical	increased frame rate
Binning method	M/C automatic
Binning factor	2

Размеры матрицы камеры составляют 6.78×5.43 мм. Общий вид камеры показан на **Рисунке 1.2.11.14**, спектральная чувствительность приведена на **Рисунке 1.2.11.15**, подробная спецификация приведена в **Таблице 1.2.11.3** и **Таблице 1.2.11.4**.

Фокальное расстояние объектива, строящего изображение пучка на камерах, зависит от деталей конструкции, в частности, от возможного расстояния от объектива до точки излучения внутри магнита. Разумно использовать в качестве объектива обычную «склейку» с компенсированной хроматической аберрацией. Нужный экземпляр несложно приобрести на рынке, например, см. в каталогах компании Edmund Optics [18].

**Таблица 1.2.11.4.** Особенности режимов работы камеры.

Pixel clock range	7 MHz - 86 MHz
Frame rate freerun mode	60
Frame rate trigger (maximum)	59
Exposure time (minimum - maximum)	0.009 ms - 2000 ms
Power consumption	1.7 W - 2.2 W
Image memory	128 MB
Special features	Linescan mode, Scaler, Sequencer, Log mode, Sensor hot pixel correction, Fine exposure, Multi-AOI

Для отражения видимой части спектра СИ в обеих системах диагностики используется охлаждаемое водой медное зеркало, размещенное внутри вакуумной камеры. Зеркало снабжено системой ручной юстировки, позволяющей производить его предварительную установку по вертикальному и горизонтальному углу для вывода света из камеры. Отражающая поверхность зеркала напылена алюминием.

Обе диагностических системы будут располагаться на оптических столах. Особое внимание следует уделить виброустойчивости подставок. Моторизованные зеркала будут закреплены на удаленно управляемых подставках 8MBM24 [19]. Фотография подставки показана на **Рисунке 1.2.11.16.**



**Рисунок 1.2.11.16.** Фотография моторизованной подставки 8MBM24.

Моторизованная подставка 8МВМ24 используется для прецизионной угловой и линейной настройки оптических элементов. Подставка оснащена концевыми выключателями, останавливающими ее движение в крайних положениях. Точность позиционирования по углу равна 10 угловым секундам. Подставки управляются контроллерами, имеющими выход в сеть Ethernet.

Диагностика продольного профиля сгустка нуждается в следующем обеспечении со стороны системы автоматизации:

- ВЧ сигнал для развертки диссектора;
- Сигнал для запуска сканирования профиля пучка;
- Сигнал для запуска системы выбора сгустка;
- Высоковольтное питание диссектора;
- Высоковольтное питание ВЭУ диссектора;
- Низковольтное питание источника света для юстировки.

Диагностика поперечного профиля пучка нуждается в следующем обеспечении со стороны системы автоматизации:

- Сигнал для запуска цифровой камеры;
- Питание цифровой камеры;
- Питание телевизионной камеры;
- Низковольтное питание источника света для юстировки.
- 1 ГГб канал Ethernet.

Шесть люминофорных датчиков (ЛД) предназначены для замыкания первого оборота и восстановления работоспособности бустера в нештатных ситуациях. ЛД используются для получения поперечного профиля пучка в однократном режиме. Изображение пучка регистрируется объективом и CMOS камерой UI-5240SE.

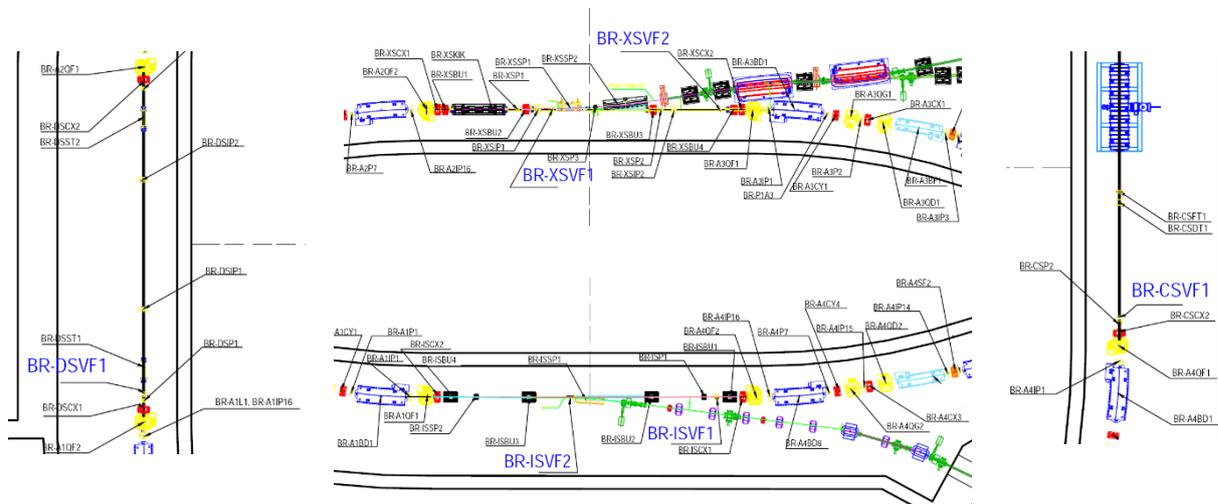
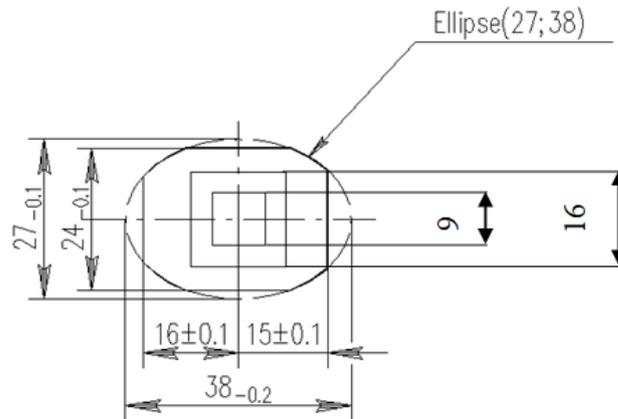


Рисунок 1.2.11.17. Места расположения люминофорных датчиков в кольце бустера.

Эта контактная диагностика пучка особенно важна при запуске установки. Первый ЛД используется для выбора режима работы септума и кикера при настройке инжекции в бустер. Второй ЛД позволяет настроить прохождение пучка через первый квадрант. Аналогичная процедура производится с использованием остальных ЛД при замыкании первого оборота пучка в бустере. Люминофорные датчики обозначены на чертежах бустера (**Рисунок 1.2.11.17**) как BR-CSVF1, BR-XSVF1, BR-XSVF2, BR-DSVF1, BR-ISVF1, BR-ISVF2.

Типичное пространственное разрешение экрана ЛД составляет 50 мкм в пределах поля зрения 20 мм. Форма экран с сеткой, нанесенной для пространственной калибровки, показана на **Рисунке 1.2.11.18**. Подложка экрана изготовлена из нержавеющей стали толщиной 1 мм, на подложку нанесен слой люминофора Р43.



**Рисунок 1.2.11.18.** Эскиз с размерами экрана ЛД.

Люминофорный экран находится внутри стакана из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм. Рассеяние в стенке стакана приводит к увеличению регистрируемого размера пучка на небольшую (по сравнению с поперечными размерами) величину при энергии инжекции 200 МэВ и полностью пренебрежимо при энергии 3 ГэВ.

Конструкция ЛД показана на **Рисунке 1.2.11.19**. Люминофорный экран помещен внутри цилиндрического объема, вместе с которым вводится и выводится из вакуумной камеры.

CMOS камера расположена вне медианной плоскости бустера и защищена свинцовым экраном, который имеет две фиксированных позиции, снабженных концевыми датчиками положения для контроля за статусом ЛД. Крышка цилиндра, при его выводе из вакуумной камеры ускорителя, служит электромагнитным экраном от полей, наводимых пучком (wake-field), тем самым, уменьшая импеданс, вносимый датчиком. Настройка CMOS камеры и объектива на фокус производится при снятой свинцовой защите. Любая деталь датчика может быть заменена без нарушения вакуума ускорителя.

Для построения изображения люминофорного экрана на сенсоре CMOS камеры используется объектив Tamron M118FM25 [20], изображенный на **Рисунке 1.2.11.20**, его параметры перечислены в **Таблице 1.2.11.5**.

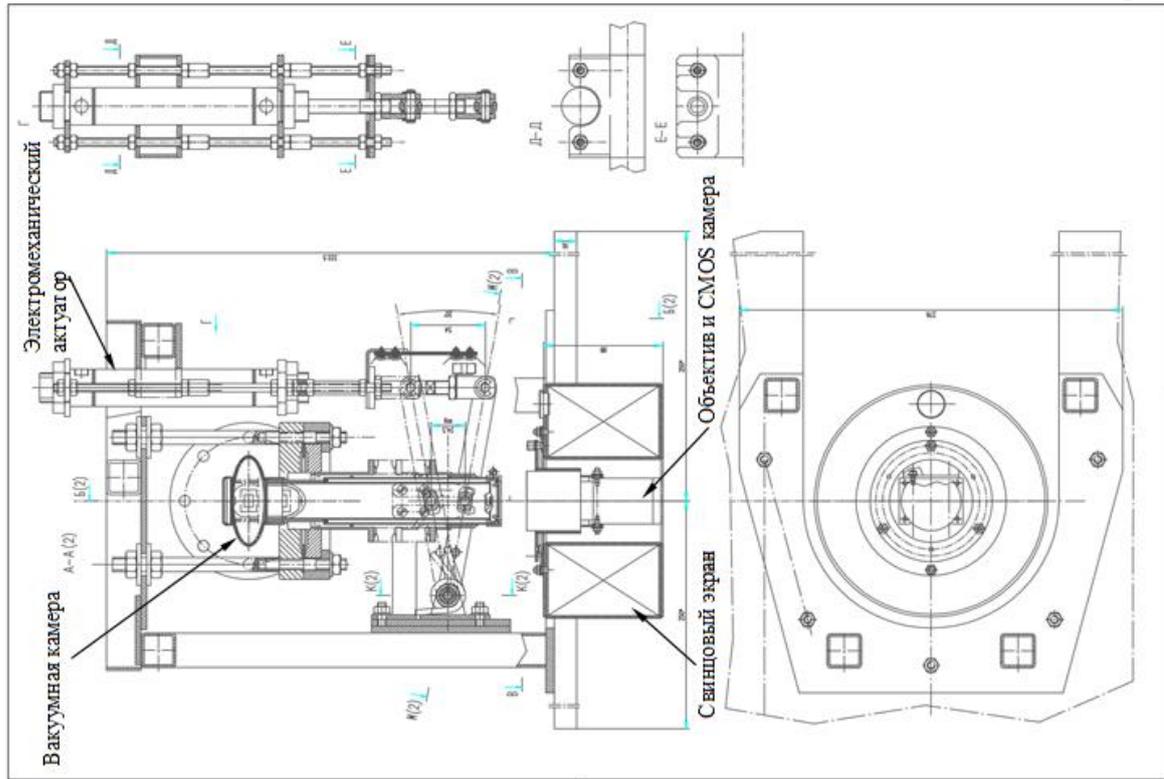


Рисунок 1.2.11.19. Конструкция люминофорного датчика.

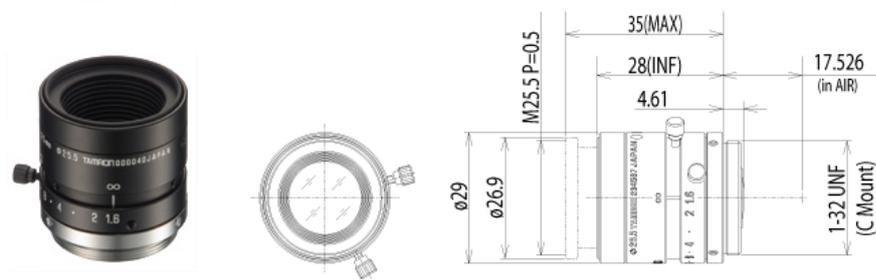
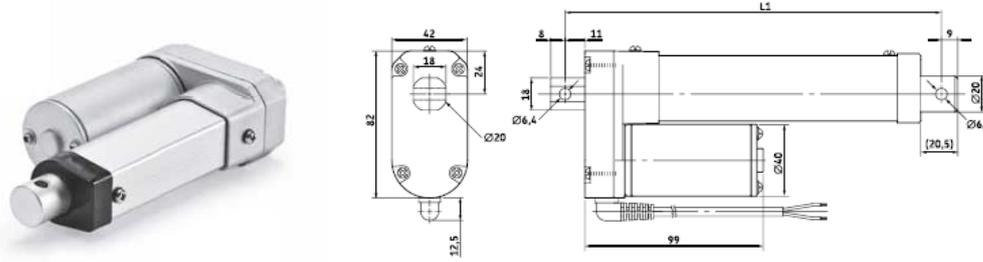


Рисунок 1.2.11.20. Объектив Tamron M118FM25.

Таблица 1.2.11.5. Технические характеристики объектива Tamron M118FM25.

Габариты, мм	29×29×40	Фокусное расстояние, мм	25
Масса, г	40	Апертура	F/1.4
Матрица	1/18"	Упр. диафрагмой	ручное
Разрешение объектива, Мп	2	Упр. фокусом	ручное
Угол обзора (гор/вер), °		Диапазон фокусировки, м	0.1÷∞
1/18"	16.6×12.5	Размер фильтра M25.5	P = 0.5 мм
1/2"	14.6×11.0	Заднее фокусное расстояние, мм	12.5
1/3"	11.0×8.2		



**Рисунок 1.2.11.21.** Линейный актуатор САНВ-10: внешний вид и габаритный чертеж.

**Таблица 1.2.11.6.** Параметры линейного актуатора САНВ-10.

Усилие толкания (макс.), Н	1000
Усилие вытягивания (макс.), Н	1000
Скорость, мм/сек	6÷8
Напряжение, В, пост. ток	12/24
Потребляемый ток, А, 12 В/24 В	2.8/1.8

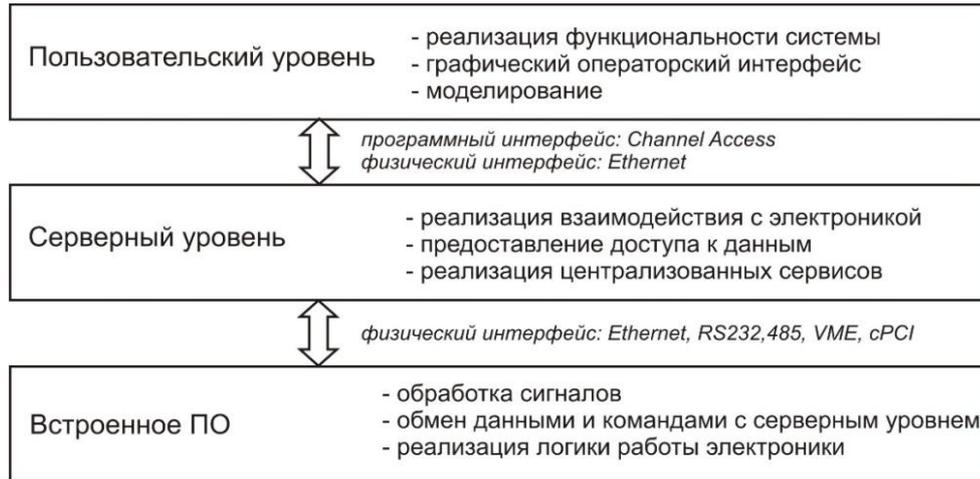
Для перемещения люминофорного экрана используется электромеханический актуатор САНВ-10 (**Рисунок 1.2.11.21**, параметры – **Таблица 1.2.11.6**).

Для регистрации потерь пучка в бустере предполагается использовать распределенный датчик на основе излучения Вавилова-Черенкова в оптоволокне. У данного датчика отсутствуют шумы, связанные с гамма- и синхротронным излучением. Во избежание перекрытия потерь пучка с разных оборотов за счет разницы скоростей движения пучка и распространения света по оптоволокну, первый отрезок оптоволокну должен располагаться в месте инъекции пучка, при этом максимальная длина отрезка оптоволокну должна быть не более:  $L \leq P/(n+1)$ , где  $P$  – периметр ускорительного кольца,  $n$  – показатель преломления сердцевины оптоволокну. Для периметра бустера  $\approx 159$  м максимальная длина отрезка оптоволокну (показатель преломления кварца  $n = 1.46$ ) составляет 65 м, что больше расчетной оптимальной длины 40 м. Для диагностики распределения потерь пучка в бустере планируется использовать датчик, состоящий из 4-х отрезков кварцевого оптоволокну марки «Thorlabs» (FG550UEC) длиной 40 м каждый в паре с ФЭУ на МКП и АЦП с полосой пропускания  $\geq 200$  МГц и частотой дискретизации  $\geq 500$  Мвыб/с.

Такие устройства пучковой диагностики бустера как стрик-камера, токовый датчик ДССТ, быстрый токовый датчик FCT и датчик потерь пучка аналогичны тем, которые планируется использовать для диагностики пучка в линаке и в транспортных каналах, и описаны выше.

## 1.2.12 Система управления и контроля

Система управления бустерным синхротроном источника СИ СКИФ базируется на EPICS. Структура системы управления строится по 3-х уровневой схеме, приведенной на **Рисунке 1.2.12.1**.



**Рисунок 1.2.12.1.** Трёхуровневая схема построения системы управления.

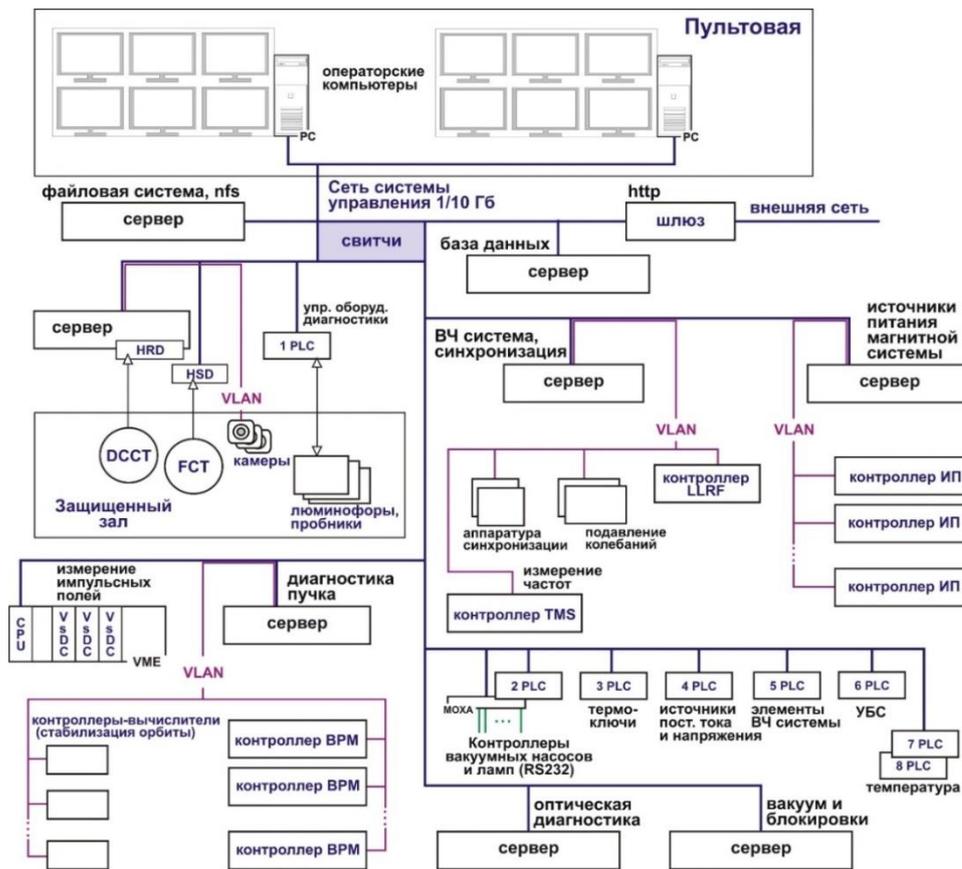
Верхний пользовательский уровень включает операторские компьютеры, в которых работают программы, предоставляющие графический интерфейс, а также программы, с помощью которых реализуются функции управления, выполняемые системой: накопление пучка, изменение режимов работы и т.п. На среднем (серверном) уровне работают серверные компьютеры, которые с помощью серверных программ обеспечивают взаимодействие с контроллерами оборудования и электроникой. На серверном уровне также работают различные сервисы, например, базы данных для сохранения значений параметров установки и пучка, а также для конфигурирования системы, общие файлово-загрузочные системы, системы поиска имен и т.д. Физическая связь между компьютерами верхнего и серверного уровня реализована внутри сегмента 10/1 Гб Ethernet, включающего управляемые свитчи, и изолированного от внешней сети с помощью шлюза (см. **Рисунок 1.2.12.1**). Нижний уровень системы управления составляют контроллеры оборудования (электроника), в которых выполняется первичная обработка и оцифровка сигналов, обеспечивается логика работы аппаратуры. Интерфейс между серверными компьютерами и электроникой реализуется с помощью различных распределенных (Ethernet, RS232, RS485) или каркасных шин (например, VME). В случае подключения электроники к серверным компьютерам через Ethernet используются локальные сегменты, что дает возможность организовать детерминированный по времени обмен данными между серверными программами (в EPICS это IOC – Input/Output Controller) и электроникой. При использовании управляемых свитчей и VLAN все коммуникации системы управления можно организовать в едином сетевом пространстве.

Блок-схема оборудования системы управления, включающая основные компьютеры и компоненты электроники, показана на **Рисунке 1.2.12.2**, пример списка компьютеров и контрольно-измерительной электроники приведен в **Таблице 1.2.12.1**. Операторские пульты компьютеры представляют собой мощные PC, каждый из которых оснащен несколькими дисплеями для вывода графической информации. Общая файловая и загрузочная системы для всех компьютеров системы управления размещается на специальных серверных станциях, обеспечивающих все необходимые сервисы. Компьютеры среднего, серверного уровня (сточные серверные системы), куда также относятся и контроллеры каркасных шин (например,

VME) распределены по функциональному назначению: управление источниками питания магнитной системы, управление системой ВЧ, управление устройствами диагностики пучка, управление вакуумной системой и т.п. На **Рисунке 1.2.12.2** показан пример распределения функций управления среди серверных компьютеров.

Электронику нижнего уровня составляют специализированные контроллеры для управления источниками питания магнитной системы, ВЧ системы, контроллеры пикапов и другая специальная электроника, обеспечивающая управление устройствами и системами ускорителей, выполняющая различные измерительные и диагностические функции, а также реализующая различные обратные связи.

Для управления вакуумным оборудованием используются промышленные контроллеры (контроллеры насосов и измерительных вакуумных ламп), которое подключается к компьютерам системы управления либо напрямую через Ethernet, либо по последовательной связи через терминальные серверы (например, MOXA). Кроме того, для контроля вакуумных шибберов используется программируемые логические контроллеры PLC (узлы PLC), с набором аналоговых и цифровых модулей (2 PLC, **Рисунок 1.2.12.2**).



**Рисунок 1.2.12.2.** Блок-схема компьютеров и аппаратуры для управления бустерным синхротроном источника СИ СКИФ.

**Таблица 1.2.12.1** Список компьютеров и электроники системы управления.

№	Наименование	Назначение
1	Пультовой компьютер	Операторские приложения
2	Серверный компьютер	Серверные приложения
3	Сетевой шлюз	Сетевые сервисы, связь с внешними сетями
4	АЦП 200 МГц	Оцифровка импульсных сигналов
5	АЦП 24 бит, 100 кГц	Оцифровка сигналов измерителя тока пучка
6	АЦП 1 ГГц	Оцифровка сигналов измерителя структуры пучка
7	VME крейт + контроллер	Обслуживание VsDC (измерение импульсных полей)
8	VsDC	Цифровой интегратор входного сигнала
9	Электроника синхронизации	Генерация сигналов запуска и тактовых сигналов, задержки запуска
10	Электроника PLC: контроллеры, источники питания, модули DI, DO, AO, AI	Диагностика пучка, управления вакуумным оборудованием, термокючичи и защита источников питания, управление вспомогательными источниками питания, управление оборудованием ВЧ, УБС, термомониторинга
11	Свитчи 10/1 Гб	24 порта, 48 портов
12	Терминальный сервер MOXA	Подключение контроллеров вакуумных насосов и ламп
13	Прецизионный контроллер источника питания	Управление сильноточными источниками питания для элементов основной структуры
14	Локальный контроллер источника питания	Управление источниками питания средней и малой мощности для корректоров и вспомогательных элементов
15	Пикап-станция (контроллер BPM)	Обслуживание пикапов
16	Контроллер ВЧ	Управление ВЧ системой (амплитудой, частотой и фазой ВЧ напряжения на резонаторах и клистронах)
17	Контроллер TMS	Управление системой измерения частот
18	Контроллер подавления поперечных колебаний	Управление подавлением поперечных колебаний
19	Контроллер пролетных датчиков	Обслуживание полетных датчиков в каналах транспортировки
20	Камеры для люминофорных пробников	-
21	Контроллер для стабилизации орбиты (вычислитель)	Управление стабилизацией орбиты

Узлы PLC используются для управления вспомогательной аппаратурой диагностики пучка (1 PLC, **Рисунок 1.2.12.2**), для построения системы блокировок (обработка сигналов от различных датчиков и управление аварийным отключением источников питания) (3 PLC, 6 PLC, **Рисунок 1.2.12.2**), для управления вспомогательными источниками питания различных систем (накалы, подсветки, актуаторы и т.п.) (4 PLC, **Рисунок 1.2.12.2**), а также для

управления различными устройствами ВЧ системы (5 PLC, **Рисунок 1.2.12.2**). Кроме того, узлы PLC используются для построения общей системы измерения температур различных элементов комплекса (7,8 PLC, **Рисунок 1.2.12.2**).

Для измерения сигналов с датчиков тока пучка предполагается использовать два типа АЦП: АЦП высокого разрешения с полосой от 0 до 100 кГц для оцифровки сигнала с датчика, измеряющего ток пучка (HRD, **Рисунок 1.2.12.2**), и АЦП высокого разрешения по времени с полосой 1-2 ГГц для оцифровки сигнала с датчика, измеряющего структуру пучка (HSD, **Рисунок 1.2.12.2**). Для измерения импульсных полей магнитов-септумов предполагается использовать модули VsDC, выполненные в формате VME, а для контроля стабильности работы магнитов-кикеров - АЦП с полосой порядка 100-200 МГц.

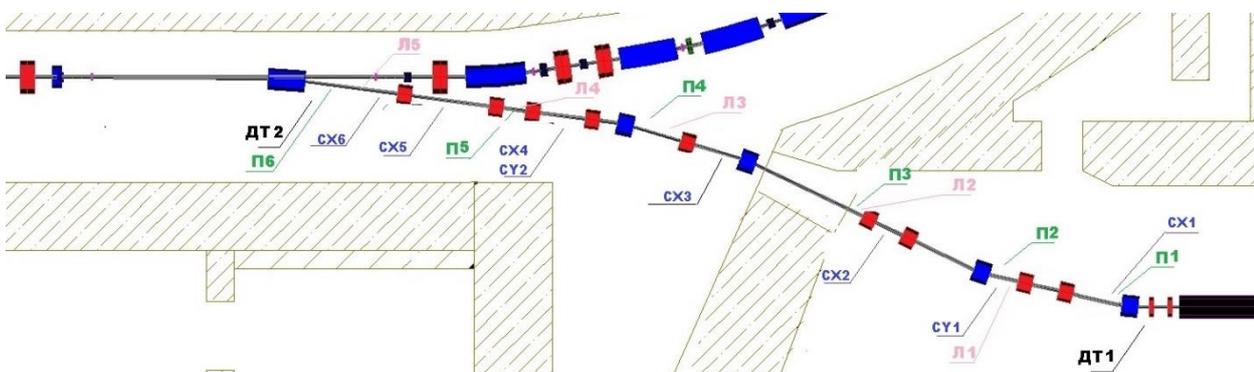
## 1.3 Каналы транспортировки

Каналы транспортировки служат для перевода электронных сгустков из одной установки в другую. В нашем случае – это канал транспортировки пучка с энергией 200 МэВ из линейного ускорителя в синхротрон-бустер (ТК1) и пучка с энергией 3 ГэВ из бустера в основное накопительное кольцо (ТК2). Каналы транспортировки должны обеспечить согласование оптических функций выхода одной установки со входом другой, чтобы добиться максимальной эффективности инжекции и перепуск пучков без потерь с учетом геометрических особенностей расположения установок друг относительно друга.

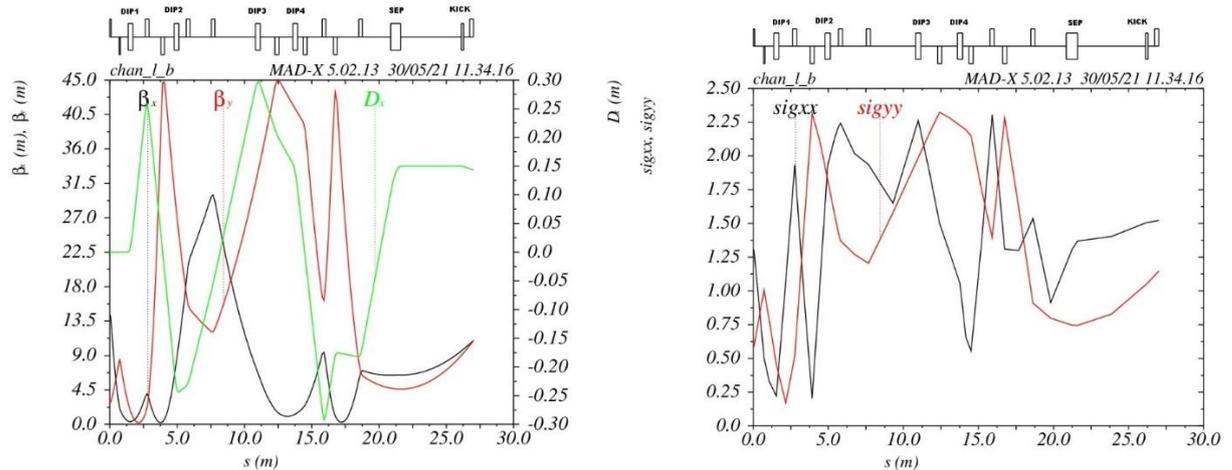
### 1.3.1 Транспортный канал ТК1 от линака до бустера

Канал ТК1 (**Рисунок 1.3.1.1**) предназначен для транспортировки пучка электронов энергией 200 МэВ и согласования параметров впускаемого пучка с оптикой бустера. Канал достаточно короткий, его длина 21 м.

Четыре дипольных магнита с вертикальным полем (канал лежит в горизонтальной плоскости) обеспечивают требуемую геометрию; два магнита поворачивают пучок на 225 мрад каждый, еще два имеют угол поворота 158.2 мрад. Девять квадрупольных линз фокусируют пучок и обеспечивают требуемое оптическое согласование. Четыре горизонтальных и четыре вертикальных корректора необходимы для исправления возможных ошибок в траектории пучка и точного нацеливания пучка при инжекции в бустер. В **Таблице 1.3.1.1** приведены оптические функции на выходе линейного ускорителя и на входе синхротрона-бустера.



**Рисунок 1.3.1.1.** Канал транспортировки пучка ТК1 от линака к бустеру.



**Рисунок 1.3.1.2.** Оптические функции канала ТК1 (слева). Размеры пучка (rms) в миллиметрах справа; предполагается энергетический разброс 0.9%.

Оптические функции, позволяющие согласовать «вход» и «выход» канала приведены на левом **Рисунке 1.3.1.2**. Максимальные бета-функции  $\beta_{xmax} \approx 29$  м,  $\beta_{ymax} \approx 45$  м, максимальное значение горизонтальной дисперсионной функции  $\eta_{xmax} \approx 0.3$  м. Для энергетического разброса из линака  $\Delta E/E = 0.9\%$  среднеквадратичные размеры пучка приведены на правом **Рисунке 1.3.1.2**. Максимальный размер пучка по обеим координатам не больше 2.4 мм.

Поля и градиенты магнитов канала ТК1, соответствующих геометрии **Рисунка 1.3.1.1** и оптическим функциям **Рисунка 1.3.1.2** приведены в **Приложении**.

**Таблица 1.3.1.1.** Оптические функции и параметры пучка в начале и в конце канала ТК1.

	Начало канала	Конец канала
beta x (м)	14.273	6.45
beta y (м)	2.816	4.62
D x (м)	0	0.15
D y (м)	0	0
D <sub>px</sub>	0	0
D <sub>py</sub>	0	0
alfa x	-2.898	0
alfa y	0.196	0
dE/E	9.0E-03	9.0E-03
emitt x (м)	1.2E-07	1.2E-07
emitt y (м)	1.2E-07	1.2E-07

Геометрия (орбита) канала задается четырьмя поворотными магнитами. Девять квадрупольных линз обеспечивают фокусировку пучка и согласование оптических функций на входе и на выходе канала для обеспечения эффективной инжекции. Конструкция ядра квадрупольных линз идентична линзам синхротрона-бустера. Четыре горизонтальных и четыре вертикальных корректора достаточно для нацеливания пучка. Питание всех магнитных элементов канала индивидуальное. Номинальные параметры канала, соответствующие оптике **Рисунка**

**1.3.1.2** приведены в Приложении. Конструктивные характеристики дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов канала ТК1 показаны в таблицах ниже.

Система пучковой диагностики включает в себя два измерителя тока пучка (в начале и в конце канала), восемь электромагнитных датчиков положения пучка и четыре люминофорных датчика для наблюдения поперечных размеров и формы пучка.

Ярмо квадрупольных линз канала такое же, как для синхротрона-бустера с межполюсным диаметром  $\varnothing 50$  мм. Апертура корректоров 45 мм определяет наружный (42.4 мм) и внутренний (39,4 мм) диаметры трубы вакуумной камеры. Система откачки ТК1 состоит из магниторазрядных вакуумных насосов со скоростью откачки 100 л/с по азоту. Три насоса располагаются на расстоянии  $8 \div 10$  метров друг от друга и соединяются с вакуумной камерой патрубками с фланцами Conflat диаметром 100 мм. Эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса с учетом соединения составляет 50 л/с по азоту. Для предотвращения прорыва атмосферы в линак или бустер в начале и в конце канала устанавливаются быстрые аварийные электропневматические шиберы (время срабатывания  $\sim 10$  мс). В канале располагается один клапан для форвакуумной откачки, один форвакуумный датчик и один датчик высокого вакуума.

Параметры дипольных и квадрупольных магнитов канала ТК1 приведены в **Таблицах 1.3.1.2-1.3.1.4**.

**Таблица 1.3.1.2.** Параметры дипольных магнитов канала ТК1.

Количество	4
Рабочая энергия	200 МэВ ( $\pm 10\%$ )
Угол поворота	2 маг. по 225 мрад 2 маг. по 158.2 мрад
Эффективная магнитная длина	350 мм
Максимальное поле с запасом	0.5 Т
Максимальный интеграл поля	0.18 Т·м
Апертура магнита	$\varnothing 50$ мм
Область хорошего поля	25×25 мм <sup>2</sup>
Качество интеграла поля в области хорошего поля	< 0.1 %
Точность выставки магнитной оси не хуже	0.1 мм

**Таблица 1.3.1.2.** Параметры квадрупольных магнитов канала ТК1.

Количество	9 (+2 линзы линака)
Рабочая энергия	200 МэВ ( $\pm 10\%$ )
Эффективная магнитная длина	300 мм
Максимальный градиент поля с запасом	10 Т/м
Максимальный интеграл градиента поля	3 Т
Апертура квадруполья	$\varnothing 50$ мм
Область хорошего поля	$\varnothing 30$ мм
Качество инт.градиента в области хорошего поля	< 0.5 %
Точность выставки магнитной оси не хуже	0.1 мм

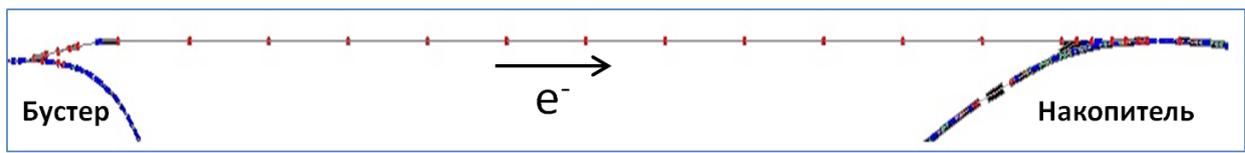
**Таблица 1.3.1.4.** Параметры корректоров канала ТК1.

Количество	4y+4x
Максимальная амплитуда поля с запасом	0.025 Т
Эффективная магнитная длина	150 мм
Апертура	Ø45 мм
Область хорошего поля	25×25 мм <sup>2</sup>
Качество поля в области хорошего поля	< 1 %

Форвакуумная откачка канала ТК1 осуществляется через цельнометаллический угловой клапан (Ø40 мм Conflat) при помощи безмасляной высоковакуумной откачной станции состоящей из турбомолекулярного насоса (быстрота откачки по воздуху 80÷100 л/с) и безмасляного форвакуумного насоса (быстрота откачки 25 м<sup>3</sup>/ч).

### 1.3.2 Транспортный канал ТК2 от синхротрона-бустера к накопителю

Канал ТК2 от бустера до накопительного кольца СКИФ предназначен для транспортировки пучков электронов энергией 3 ГэВ и согласования параметров впускаемого и циркулирующего в синхротроне пучков (**Рисунок 1.3.2.1**).

**Рисунок 1.3.2.1.** Канал ТК2 от бустера до синхротрона.

Чтобы вести работы с пучком в инжекционном комплексе во время монтажа накопительного кольца, а также, для обеспечения потенциальной возможности в будущем использовать пучок из бустера для других экспериментов (в регулярном режиме инжекция в накопитель СКИФ происходит раз в несколько минут, и остальное время инжекционный комплекс свободен), бустер вынесен за пределы накопительного кольца. Соответственно, чтобы избежать пересечения с каналами вывода СИ впуск пучка осуществляется снизу вверх, а сам канал лежит ниже медианной плоскости накопителя на 4.5 м. Подобная схема инжекции применена в источнике СИ четвертого поколения MAX IV (Лунд, Швеция) [21].

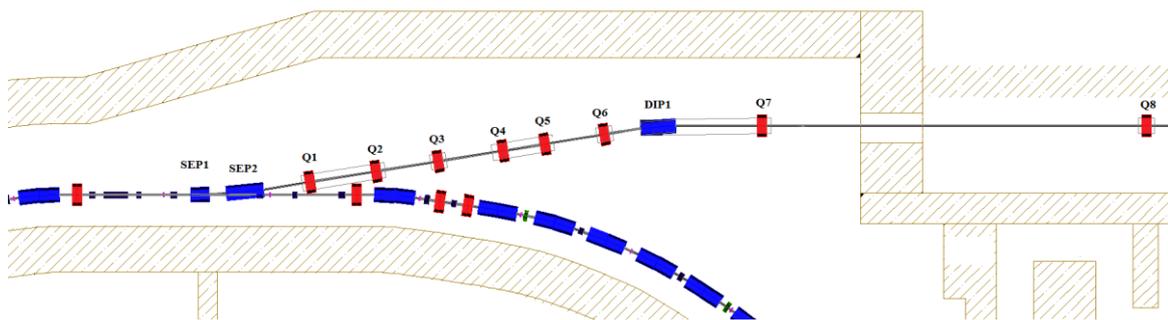
В **Таблице 1.3.2.1** приведены оптические функции и параметры пучка на выходе синхротрона-бустера и на входе в основной накопитель.

Геометрия канала определяется одним горизонтальным дипольным магнитом с углом поворота 159.8 мрад, двумя вертикальными (126.6 мрад), постоянным DC-септум магнитом (166 мрад) и впускным септум-магнитом типа Ламбертсона (87.3 мрад). Двадцать восемь квадрупольных линз обеспечивают фокусировку пучка. Набор слабых корректирующих магнитов (одиннадцать в горизонтальной и одиннадцать в вертикальной плоскостях) нужны для коррекции орбиты и нацеливания пучка на впуске в накопитель.

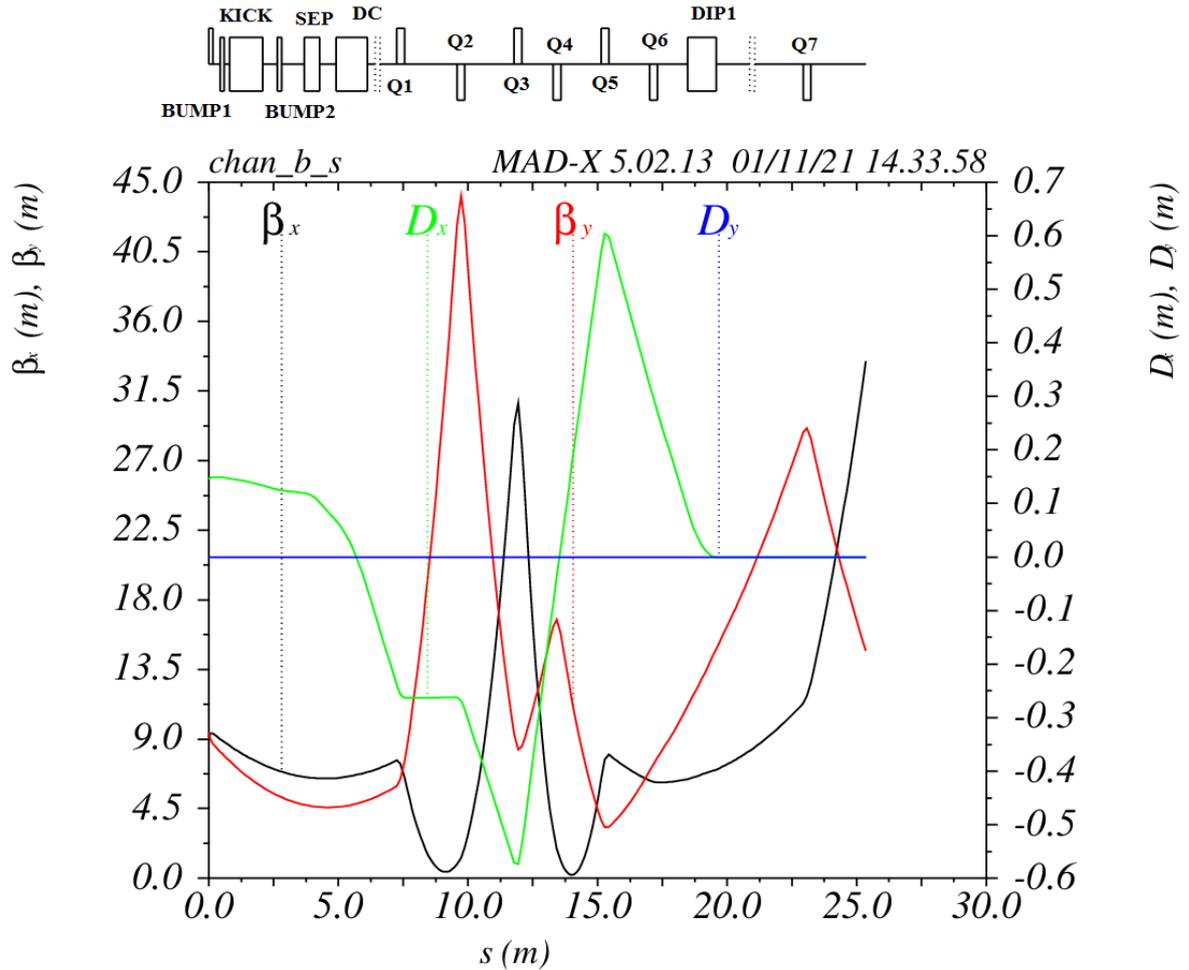
**Таблица 1.3.2.1.** Оптические функции и параметры пучка на выходе синхротрона-бустера и на входе в основной накопитель.

	Выпуск из Бустера	Впуск в Накопитель
beta x (м)	9,149	15,63
beta y (м)	9,423	2,399
D x (м)	0,145	0
D y (м)	0	0
D <sub>px</sub>	0,045	0
D <sub>py</sub>	0	0
alfa x	-2,147	0
alfa y	3,814	0
dE/E	9,0E-04	9,0E-04
x (м) emitt	4,0E-08	4,0E-08
y (м) emitt	4,0E-09	4,0E-09

ТК2 можно условно разбить на 3 участка. Первый участок расположен в зале бустера (Рисунок 1.3.2.2) и включает в себя горизонтально поворачивающий диполь и 6 квадрупольных линз для настройки оптики и зануления горизонтальной дисперсионной функции. Оптические функции первого участка показаны на Рисунке 1.3.2.3.



**Рисунок 1.3.2.2.** Схема выпуска пучка из бустера и горизонтальный ахроматический поворот. SEP1 и SEP2 – выпускные септум-магниты, DIP1 – горизонтальный дипольный магнит, Q1-Q8 – квадрупольные линзы.



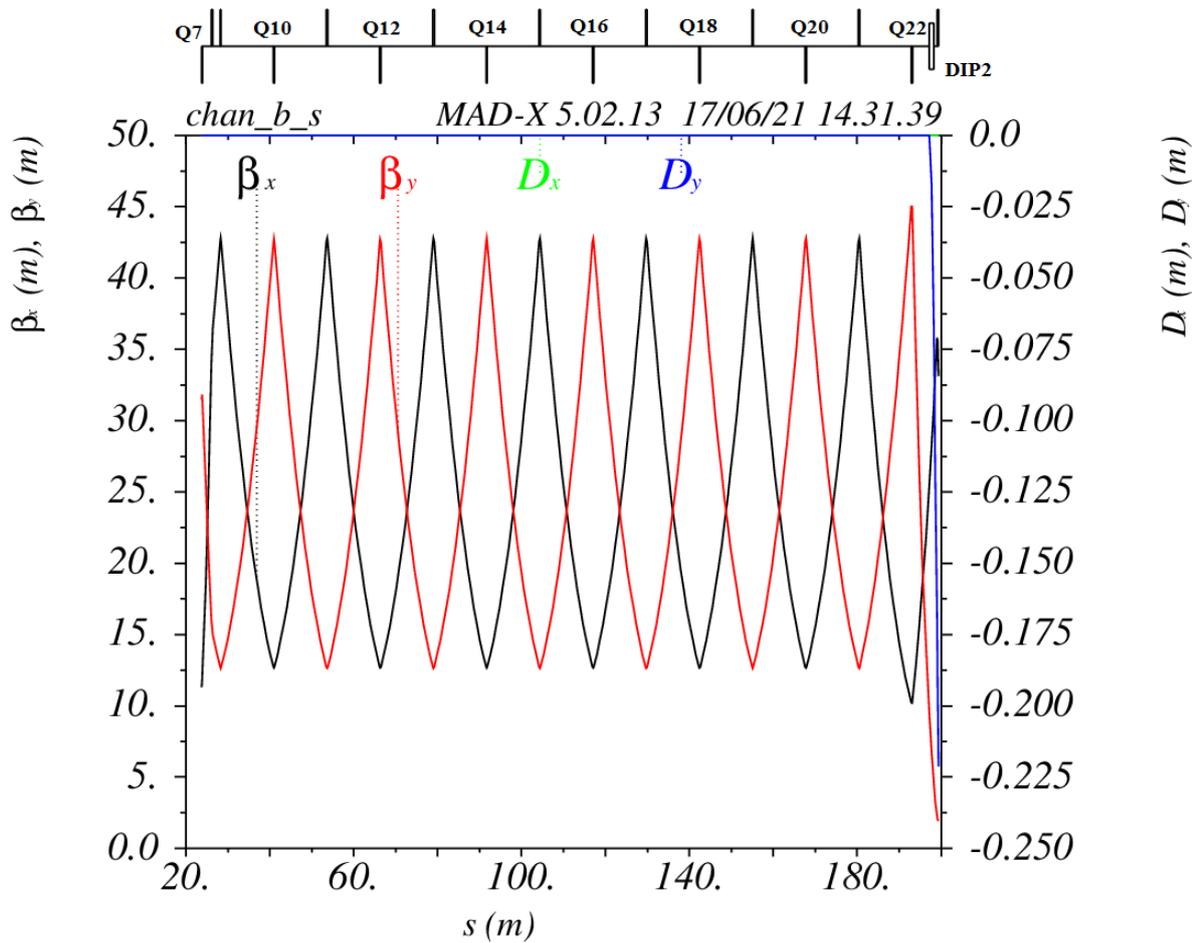
**Рисунок 1.3.2.3.** Оптические функции первого участка канала ТК2.

Вторая часть канала – прямолинейная (**Рисунок 1.3.2.4**) содержит 16 квадрупольных линз и предназначена для транспортировки пучка из зала бустера в зал накопителя по длинному ( $L \approx 180$  м) тоннелю.



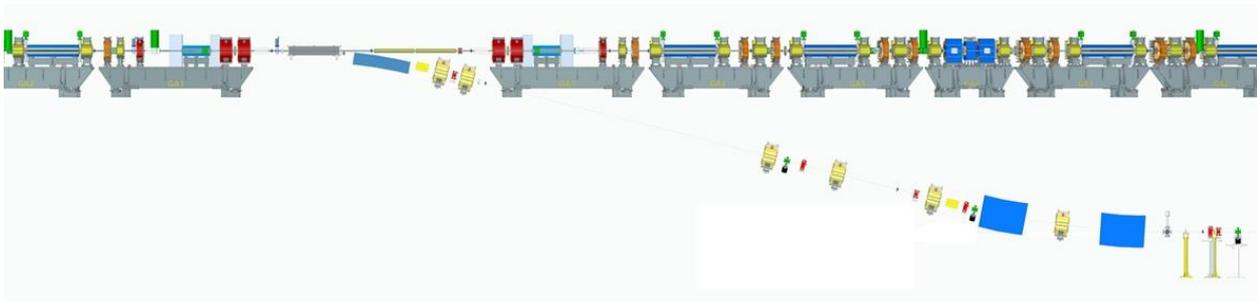
**Рисунок 1.3.2.4.** Прямолинейная часть канала ТК2.

Оптические функции первого и второго сегментов канала ТК2 совместно показаны на **Рисунке 1.3.2.5**.

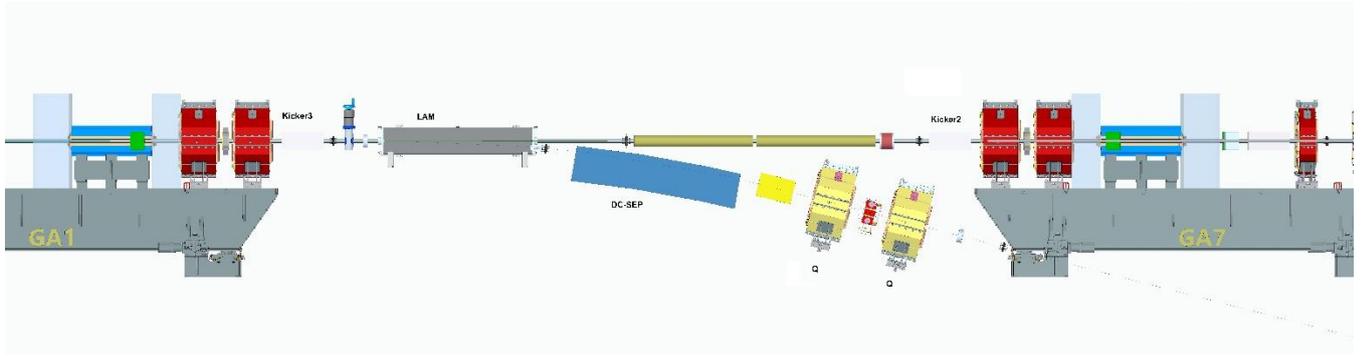


**Рисунок 1.3.2.5.** Оптические функции второго участка ТК2.

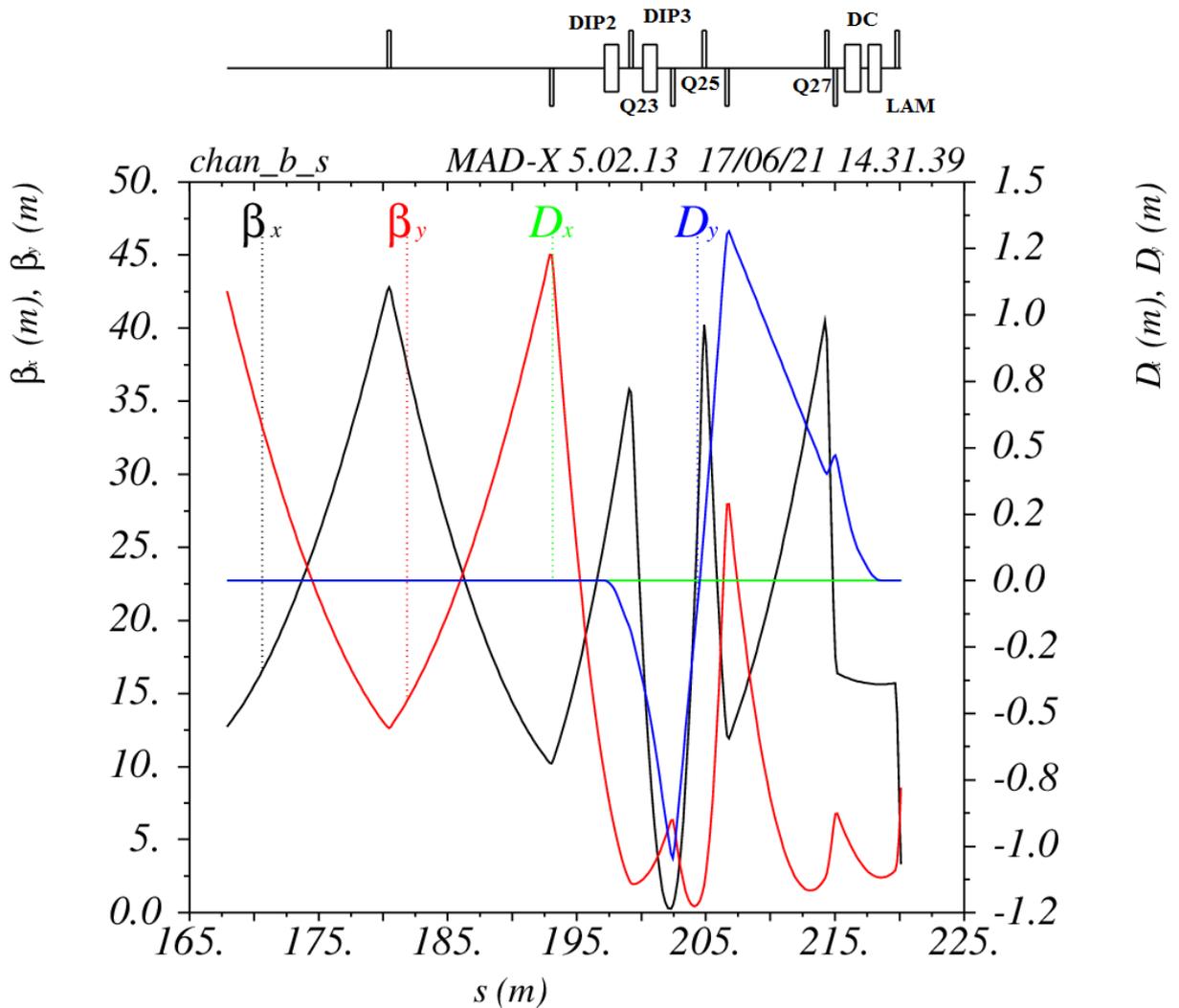
Третья часть канала ТК2 осуществляет подъем перепускаемого пучка на высоту медианной плоскости накопителя (перепад высот 4.5 м). Схема третьей части и более подробно конечная часть ТК2 показаны на **Рисунках 1.3.2.6 и 1.3.2.7** соответственно. Третья часть состоит из двух вертикальных дипольных магнитов, шести квадрупольных линз, впускного DC септум-магнита и впускного магнита (септума) Ламбертсона. Подъем представляет собой ахроматический поворот, и на входе в накопительное кольцо дисперсионные функции по обеим координатам и их производные равны нулю. Бетатронные функции канала согласованы с бетатронными функциями накопителя в точке встречи пучка.



**Рисунок 1.3.2.6.** Подъем канала ТК2 из тоннеля к накопителю.

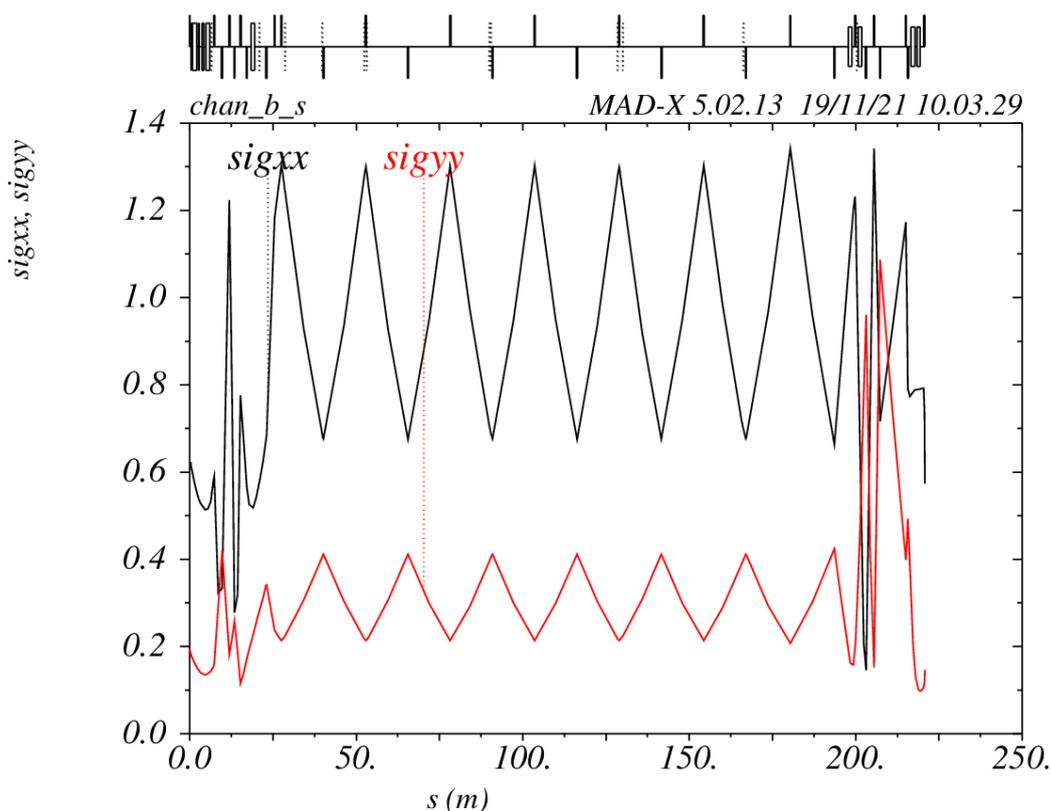


**Рисунок 1.3.2.7.** Соединение канала ТК2 и накопителя. LAM – септум-магнит Ламбертсона, DC-SEP – септум постоянного тока. Вид снаружи кольца.



**Рисунок 1.3.2.8.** Оптические функции участка подъема канала ТК2.

Оптические функции участка подъема канала ТК2 показаны на **Рисунке 1.3.2.8**. Среднеквадратичный размер пучка (одно стандартное отклонение) приведен на **Рисунке 1.3.2.9**.



**Рисунок 1.3.2.9.** Горизонтальный и вертикальный среднеквадратичные размеры (одно стандартное отклонение) пучка в канале ТК2.

Основные параметры дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов канала ТК2 приведены в **Таблицах 1.3.2.3 – 1.3.2.6.**

**Таблица 1.3.2.3.** Основные параметры дипольных магнитов канала ТК2.

Количество	3
Рабочая энергия	3 ГэВ ( $\pm 5\%$ )
Максимальный угол поворота	160 мрад
Эффективная магнитная длина	1100 мм
Максимальное поле с запасом	1.36 Тл
Максимальный интеграл поля	1.5 Тл·м
Межполюсный зазор	30 мм
Область хорошего поля	20×20 мм <sup>2</sup>
Неоднор.интеграла поля в области хорошего поля	< 0.1 %

В качестве линз для канала от бустера до накопителя было предложено использовать 16 линз бустера QF с апертурой 50 мм и 12 более сильных линз накопителя QFA с апертурой 30 мм.

Корректоры способны отклонять пучок на 1 мрад. Корректоры однокоординатные на энергии 3000 МэВ ( $\pm 5\%$ ). Требования на дизайн корректоров приведены в таблице. В канале планируется иметь 11 горизонтальных и 11 вертикальных корректора.

**Таблица 1.3.2.4.** Основные параметры квадрупольных магнитов QFA канала ТК2.

Количество	12
Рабочая энергия	3 ГэВ ( $\pm 5\%$ )
Эффективная магнитная длина	300 мм
Максимальный градиент поля с запасом	50 Тл/м
Максимальный интеграл градиента поля	15 Тл
Апертура квадруполь	$\varnothing 30$ мм
Область хорошего поля	$\varnothing 20$ мм
Неоднор.интеграла градиента в области хорошего поля	$< 0.5$ %

**Таблица 1.3.2.5.** Основные параметры квадрупольных магнитов QF канала ТК2.

Количество	14
Рабочая энергия	3 ГэВ ( $\pm 5\%$ )
Эффективная магнитная длина	300 мм
Максимальный градиент поля с запасом	30 Тл/м
Максимальный интеграл градиента поля	9 Тл
Апертура квадруполь	$\varnothing 50$ мм
Область хорошего поля	$\varnothing 35$ мм
Неоднор.интеграла градиента в области хорошего поля	$< 0.5$ %

**Таблица 1.3.2.6.** Основные параметры корректирующих магнитов канала ТК2.

Количество	22 (11верт.+1 гор.)
Максимальная амплитуда поля с запасом	0.17 Тл
Эффективная магнитная длина	300 мм
Межполюсный зазор	30 мм
Область хорошего поля	$20 \times 20$ мм <sup>2</sup>
Качество поля в области хорошего поля	$< 1$ %

В качестве квадрупольных линз начальной части канала и участка подъема выбраны магниты основного кольца с ДУ=30мм. Соответственно диаметр вакуумной камеры выбран 28 мм. В длинном прямолинейном промежутке используются линзы бустера QF с ДУ=50мм и корректоры бустера с апертурой 45 мм. Диаметр вакуумной камеры на этом участке канала выбран 42.4 мм.

Высоковакуумная откачка канала из линака в бустер состоит из магниторазрядных вакуумных насосов с быстротой откачки, равной 100 л/с по азоту. Магниторазрядные насосы располагаются на расстоянии 8÷10 метров друг от друга. Подсоединение магниторазрядных насосов выполняется через патрубки с фланцами Ду 100 СФ. Эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса составляет 50 л/с по азоту.

Для предотвращения прорыва атмосферы в бустер или накопитель в начале и конце канала устанавливаются быстрые аварийные электропневматические шиберы (время срабатывания ~ 10 мс). Также весь канал будет разделен на две части ручным шибером.

В каждой части канала располагается по два клапана для форвакуумной откачки, два форвакуумных датчиков, два датчика высокого вакуума и порядка десяти магниторазрядных насосов.

Форвакуумная откачка осуществляется через цельнометаллический угловой клапан Ду 40 СФ при помощи безмасляной высоковакуумной откачной станции, состоящей из турбомолекулярного насоса (быстрота откачки по воздуху  $80 \div 100$  л/с) и безмасляного форвакуумного насоса (быстрота откачки  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Вакуумная камера выполняется из трубы нержавеющей стали марки 316 L. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения типа Conflat Ду 63, соединения вакуумной камеры выполнены аргоно-дуговой сваркой. Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного изменением температуры в тоннеле, применены сильфонные узлы.

Канал, соединяющий бустер с накопителем, имеет 10 люминофорных датчиков, 18 пикап-станций и два токовых датчика. Конструкция люминофорных датчиков этого канала аналогична тем, что установлены в канале линак-бустер

Перед дампом пучка канала бустер-накопитель будет установлен люминофорный датчик, позволяющий измерять эмиттанс пучка, выпущенного из бустера.

### 1.3.3 Инжекционные магниты-кикеры

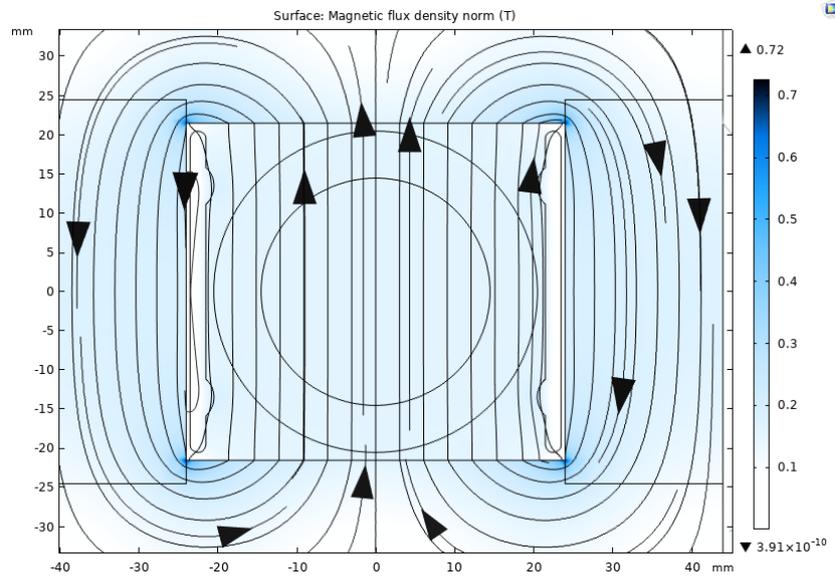
Для инъекции в основное кольцо СКИФ требуются две пары кикерных секций: апертуры и эффективные длины кикеров в каждой паре одинаковые. Каждая секция представляет собой отрезок керамической вакуумной камеры круглого сечения с внутренним сплошным титановым напылением (толщина напыления –  $2 \div 3 \text{ мкм}$ ) и внешним расположением ферритового сердечника. Основные параметры кикерных секций приведены в **Таблице 1.3.3.1**. В таблице приведены параметры кикеров для режима инъекции на равновесную орбиту с максимальной амплитудой. В основном режиме (режим накопления) предполагается уменьшение полей и токов в 1.5 раза соответственно.

Импульс каждого кикера представляет собой полу-синус длительностью  $3.2 \text{ мкс}$ . Длительность участка с вариацией амплитуды меньше 1% составляет 300 нс. Частота следования импульсов 1 Гц. Эффективная длина (по полю) каждого кикера составляет 300 мм, габаритная длина от фланца до фланца – 350 мм.

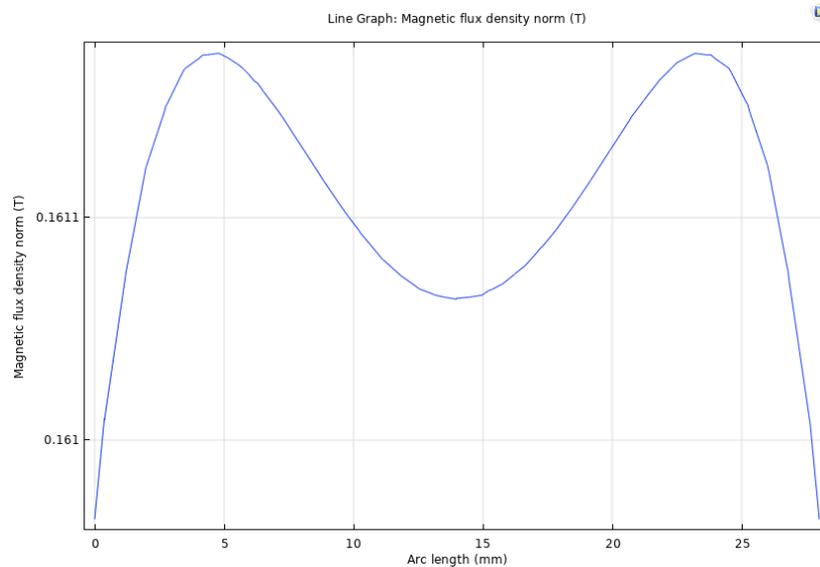
**Таблица 1.3.3.1.** Параметры магнитов-кикеров основного кольца.

Параметр	Кикер 1	Кикер 2	Кикер 3	Кикер 4
Угол удара, мрад	2.48	1.58	2.96	4.64
Апертура, Ø мм	29	37	37	29
Макс.ток, А	2940	2250	4200	5500
Индуктивность (расчетная), нГн	500	500	500	500
Макс.ампл.поля, Т	0.09	0.054	0.101	0.16
Интеграл поля, Тм	0.047	0.03	0.03	0.047

На **Рисунках 1.3.3.1 и 1.3.3.2** приведены результаты моделирования поля в центральном сечении кикера с апертурой 29 мм в режиме с максимальной амплитудой на равновесную орбиту.



**Рисунок 1.3.3.1.** Силовые линии магнитного поля в центральном сечении кикера.



**Рисунок 1.3.3.2.** Распределение магнитного поля в центральном сечении кикера.

Структура и распределение поля в магните с апертурой 37 мм аналогичны.

На **Рисунке 1.3.3.3** показано распределение поля на эффективной длине 300 мм магнита с апертурой 29 мм.

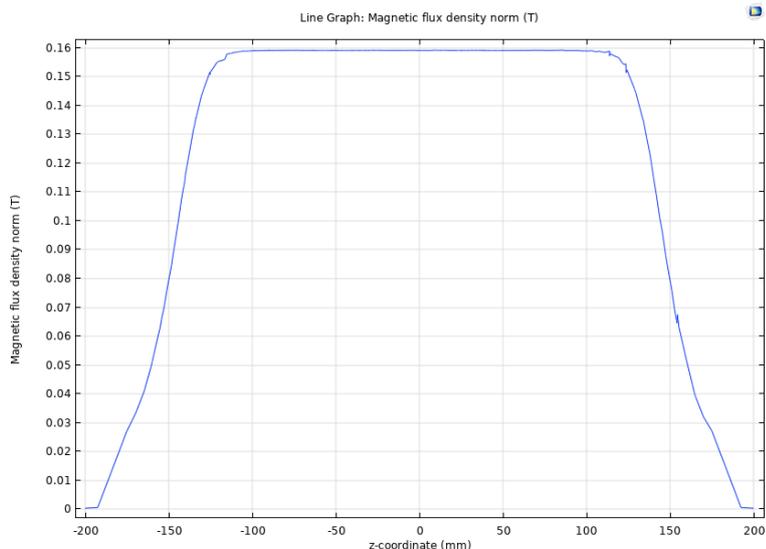


Рисунок 1.3.3.3. Распределение поля на эффективной длине магнита (3D-моделирование).

Для прохождения действующего на пучок магнитного поля кикера и обеспечения импеданса камеры к пучку на внутреннюю поверхность керамической камеры нанесено сплошное напыление титана слоем 2-3  $\mu\text{м}$ .

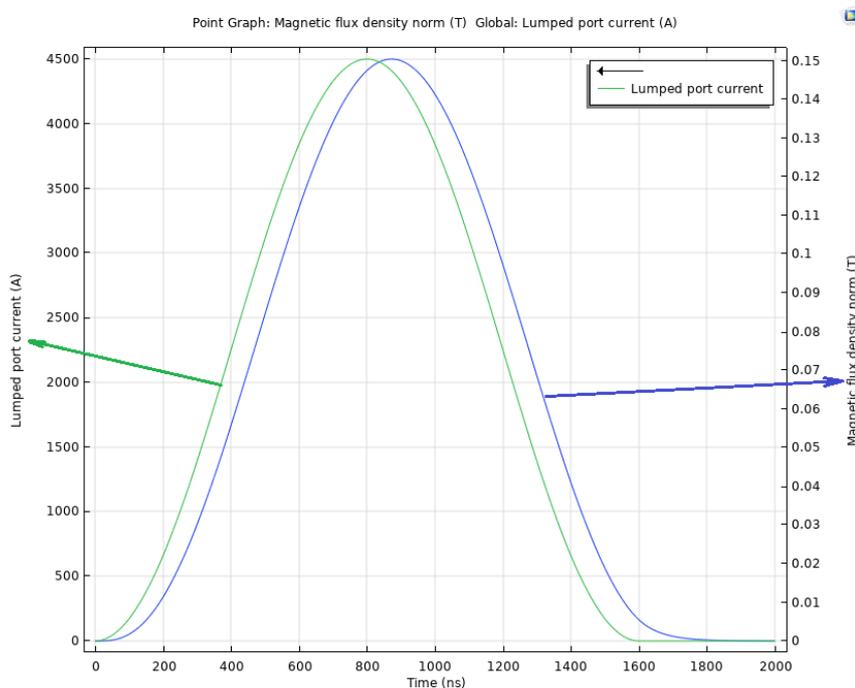
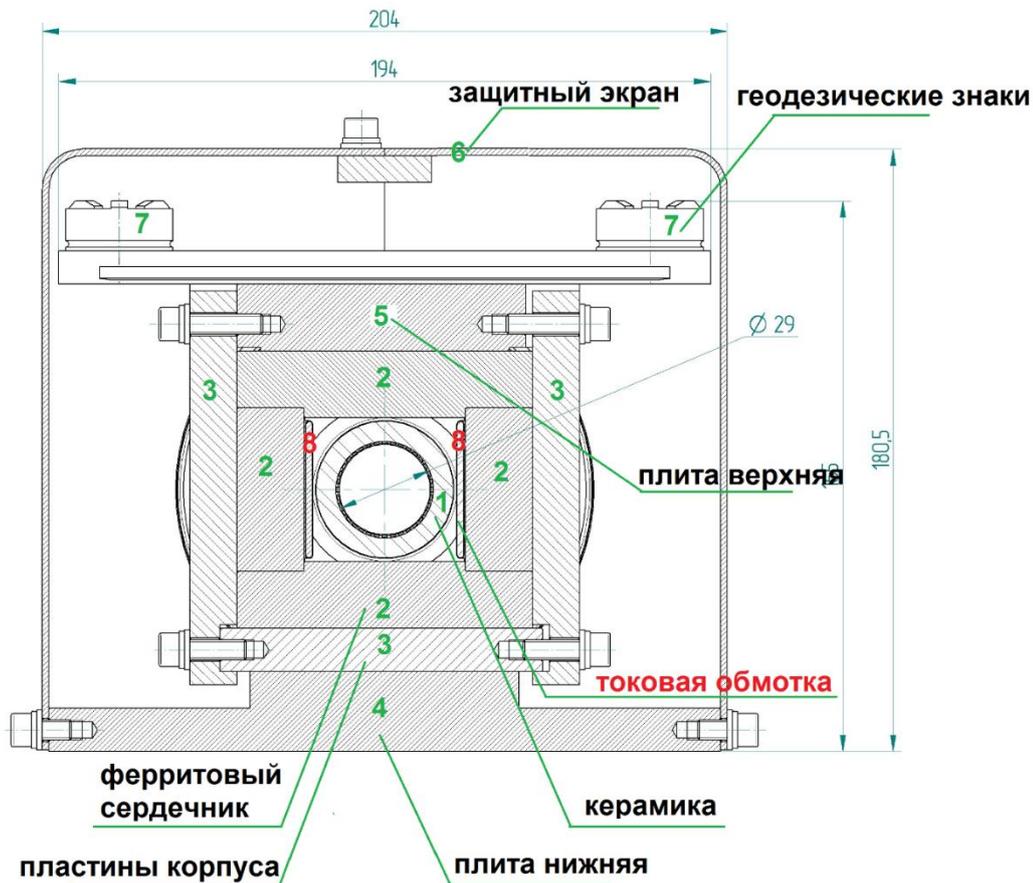


Рисунок 1.3.3.4. Импульс магнитного поля в центре на оси кикерного магнита (синий), и импульс тока на пластинах, длительностью 1600 нс по основанию (зеленый). Толщина напыления чистого титана 2.5  $\mu\text{м}$ .

С помощью моделирования прохождения магнитного поля в виде полусинусоидального импульса с длительностью по основанию  $1.6 \mu\text{s}$  сделана оценка изменения формы импульса при прохождении через указанный слой титана. Результат показан на рис.1.3.3.4. Выбранная толщина напыления является оптимальной для обеспечения параметров циркулирующего и инжектируемого пучков. Оценка нагрева камеры при токе накопленного пучка  $400 \text{ mA}$  дала следующие результаты: нагрев камеры длиной  $350 \text{ mm}$  токами изображения не более  $10 \text{ Вт}$ , нагрев вихревыми токами от импульсного магнитного поля длительностью  $3.2 \mu\text{s}$  не более  $0.03 \text{ Вт}$ .

В центре магнита-кикера (**Рисунок 1.3.3.5**) размещена керамическая ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ ВК-96}$ ) вакуумная камера с толщиной стенок  $7 \text{ mm}$ , с круглым отверстием под пучок и диаметром одной пары кикеров  $29 \text{ mm}$  и другой пары  $37 \text{ mm}$ . Магнитный сердечник кикера выполнен из ферритовых брусков марки  $\text{СМД5005}$  в сечении  $20 \text{ mm}$ . Верхний и нижний бруски имеют вырезы для фиксации боковых брусков.

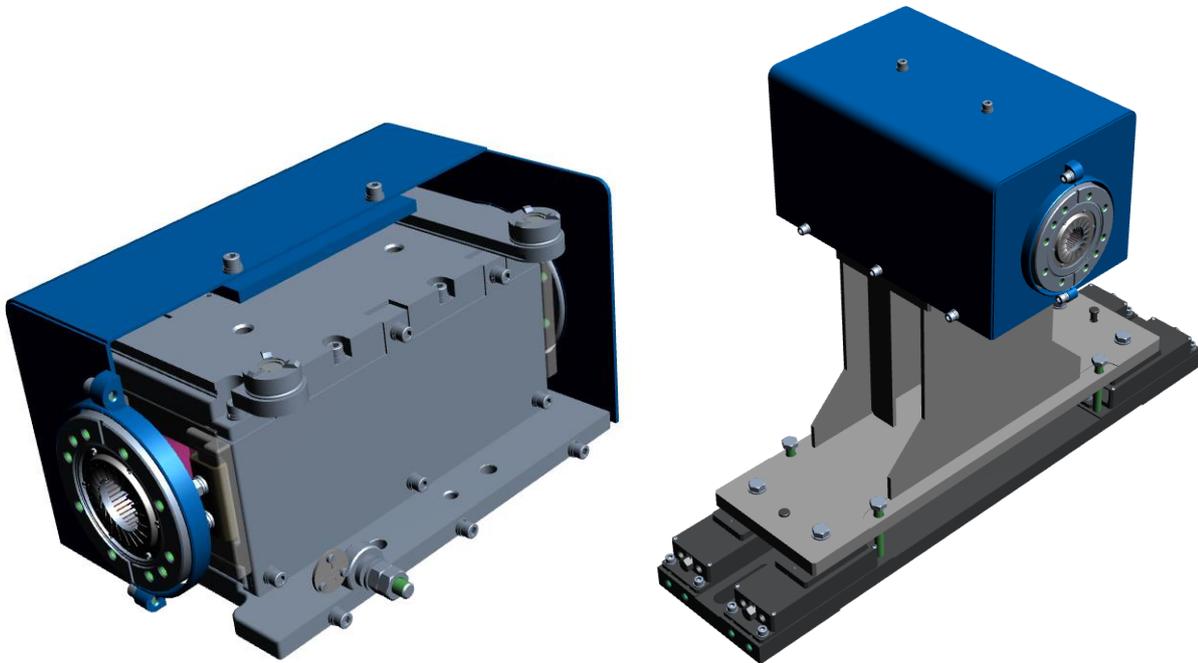


**Рисунок 1.3.3.5.** Центральное сечение кикера накопителя СКИФ.

На боковых поверхностях вертикальных ферритовых брусков расположены токопроводящие шины (поз.8), составляющие одновитковую обмотку кикера. Эти шины приклеиваются к вертикальным брускам феррита с помощью кремнийорганического материала «Виксинт» марки К-68. Выводы токовой обмотки в местах подключения к питающим генераторам так же покрываются «Виксинтом». Необходимый допуск выставки магнитного зазора кикера относительно пучка обеспечивается точностью изготовления ферритовых брусков. Окончательная

выставка кикеров производится по геодезическим знакам, расположенным в углах верхней плиты (поз.7).

На **Рисунке 1.3.3.6** показаны 3D-модель кикера и расположение его на специальной подставке.



**Рисунок 1.3.3.6.** Трехмерная модель конструкции кикера с апертурой 29 мм (слева) и его размещение на подставке.

## Список цитируемой литературы

- [1] Yu.Maltseva, A.Andrianov et al. VEPP-5 injection complex: new possibilities for BINP electron-positron colliders. Proc.of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, doi:10.18429, p.371.
- [2] S.Gurov, A.Akimov et al. Status of NSLS-II booster. Proc.of PAC2011, New York, NY, USA, WEP201, p.1864.
- [3] <https://rudatasheet.ru/tubes/gs-34/>.
- [4] K.Floetman, ASTRA user manual at: [http://www.desy.de/~mpyflo/Astra\\_manual](http://www.desy.de/~mpyflo/Astra_manual).
- [5] V.E.Akimov, A.V.Anoshin, M.S.Avilov et al. Test of electron linac for VEPP-5 pre-injector, Proc.of EPAC2000, Vienna, Austria, p.1648.
- [6] J. Wang, “RF Properties of Periodic Accelerating Structures for Linear Colliders”, SLACReport-339, July 1989.
- [7] В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. Техническая электродинамика. Радио и связь. М: 2000 г, с. 449-452.
- [8] <https://www.bergoz.com/products/fct/>.
- [9] Мальцева Ю.И. и др. Распределённый датчик потерь пучка на основе черенковского излучения в оптоволокне // УФН. — 2015. — Vol. 185, no. 5. — Pp. 553–556.

- [10] <https://energ-on.ru/tiristornyy-regulyator-trm-3m-30/>.
- [11] [http://inp.nsk.su/images/diss/Sinyatkin\\_disser.pdf](http://inp.nsk.su/images/diss/Sinyatkin_disser.pdf).
- [12] S.Y.Lee. A multipole expansion for the field of vacuum chamber eddy currents. // NIM A300, pp. 151-158, 1991.
- [13] S. Moaveni. Finite Element Analysis Theory and Applications with ANSYS. // Pearson, 2008.
- [14] <https://mad.web.cern.ch/mad/>.
- [15] <https://triadatv.ru/>.
- [16] [https://www.triadatv.ru/download/Triada-TV\\_DVB-T2\\_transmitters\\_2014\\_rus\\_rev1.pdf](https://www.triadatv.ru/download/Triada-TV_DVB-T2_transmitters_2014_rus_rev1.pdf).
- [17] С.В.Андреев, Н.С.Воробьев, В.Л.Дорохов и др. Пикосекундный электронно-оптический диссектор со скрещенной разверткой, ПТЭ, 2020, №1, стр.96-100.
- [18] <https://www.edmundoptics.com/>.
- [19] [http://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=251](http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=251).
- [20] [https://tamron.ru/machine\\_vision/m118fm25](https://tamron.ru/machine_vision/m118fm25).
- [21] [https://www.maxiv.lu.se/wp-content/plugins/alfresco-plugin/ajax/downloadFile.php?object\\_id=e050eeb2-b53f-4a9d-aac1-ae5146cc1a89](https://www.maxiv.lu.se/wp-content/plugins/alfresco-plugin/ajax/downloadFile.php?object_id=e050eeb2-b53f-4a9d-aac1-ae5146cc1a89).

## Приложение. Параметры каналов транспортировки пучка электронов СКИФ, соответствующие проектной настройке

1. Номинальные параметры магнитов канала ТК1; магнитная жесткость  $B\rho = 0.6667$  Тм. Здесь:  $S$  – продольная координата начала элемента,  $L$  – длина элемента,  $K_1L$  – интегральная приведенная сила квадруполя.

NAME	KEYWORD	S	L	ANGLE	K1L	B, T	G, T/m
		m	m	rad	1/m		
Q1	QUADRU	0.1	0.1	0	1.155052	0	7.700735
Q2	QUADRU	0.775	0.1	0	-1.3758	0	-9.17248
DIP1	SBEND	1.715	0.35	0.225	0	0.428593	0
CY1	VKICKER	2.056	0.15	0	0	0	0
PICK1	MONITOR	2.41	0.195	0	0	0	0
Q3	QUADRU	2.908221	0.28	0	1.825573	0	4.346821
CX1	HKICKER	3.258221	0.15	0	0	0	0
PICK2	MONITOR	3.718221	0.195	0	0	0	0
Q4	QUADRU	4.06532	0.28	0	-0.96505	0	-2.29786
LUM1	MONITOR	4.66532	0.3	0	0	0	0
DIP2	SBEND	5.132346	0.35	0.225	0	0.428593	0
PICK3	MONITOR	5.527346	0.195	0	0	0	0
Q5	QUADRU	5.954328	0.28	0	0.329898	0	0.78551
CY2	VKICKER	6.404328	0.15	0	0	0	0
Q6	QUADRU	7.812479	0.28	0	0.25679	0	0.611436
PICK4	MONITOR	8.207479	0.195	0	0	0	0
DIP3	SBEND	11.16886	0.35	-0.15818	0	-0.30131	0
LUM2	MONITOR	11.66886	0.3	0	0	0	0
Q7	QUADRU	12.55323	0.28	0	-0.14154	0	-0.33701
CX2	HKICKER	12.90323	0.15	0	0	0	0
PICK5	MONITOR	13.29823	0.195	0	0	0	0
DIP4	SBEND	13.94488	0.35	-0.15818	0	-0.30131	0
CY3	VKICKER	14.19488	0.15	0	0	0	0
Q8	QUADRU	14.64797	0.28	0	-0.2411	0	-0.57408
CX3	HKICKER	15.39797	0.15	0	0	0	0
PICK6	MONITOR	15.69297	0.195	0	0	0	0
Q9	QUADRU	16.05037	0.28	0	1.282021	0	3.052582
LUM3	MONITOR	16.47037	0.3	0	0	0	0
Q10	QUADRU	16.88524	0.28	0	-0.88987	0	-2.11884
CX4	HKICKER	17.36024	0.15	0	0	0	0
PICK7	MONITOR	17.75524	0.195	0	0	0	0
Q11	QUADRU	18.76405	0.28	0	0.749456	0	1.784509
LUM4	MONITOR	19.16405	0.3	0	0	0	0
CY4	VKICKER	19.41405	0.15	0	0	0	0
PICK8	MONITOR	19.70905	0.195	0	0	0	0
SEP	SBEND	21.60058	0.75	-0.125	0	-0.11112	0

2. Рабочие параметры магнитов и квадрупольных линз канала ТК2 для энергии пучка 3 ГэВ ( $B\rho = 10 \text{ Т}\cdot\text{м}$ )

NAME	KEYWORDS	S	L	ANGLE	K1L	B, T	G, T/m
		m	m	rad	1/m		
Q1	QUADRUP	7.469623	0.3	0	0.587253	0	19.58864
Q2	QUADRUP	9.94015	0.3	0	-0.49126	0	-16.3868
Q3	QUADRUP	12.28561	0.3	0	0.834772	0	27.84501
Q4	QUADRUP	13.91739	0.3	0	-0.57909	0	-19.3165
Q5	QUADRUP	15.91208	0.3	0	0.816789	0	27.24515
Q6	QUADRUP	17.93465	0.3	0	0.035841	0	1.195533
DIP1	SBEND	20.33191	1.1	0.1585	0	1.441907	0
Q7	QUADRUP	23.98914	0.3	0	-0.22596	0	-7.53728
Q8	QUADRUP	26.40426	0.3	0	0.135614	0	4.523611
Q9	QUADRUP	28.4323	0.3	0	0.08664	0	2.889985
Q10	QUADRUP	41.11265	0.3	0	-0.0867	0	-2.89195
Q11	QUADRUP	53.793	0.3	0	0.08664	0	2.889985
Q12	QUADRUP	66.47334	0.3	0	-0.0867	0	-2.89195
Q13	QUADRUP	79.15369	0.3	0	0.08664	0	2.889985
Q14	QUADRUP	91.83404	0.3	0	-0.0867	0	-2.89195
Q15	QUADRUP	104.5144	0.3	0	0.08664	0	2.889985
Q16	QUADRUP	117.1947	0.3	0	-0.0867	0	-2.89195
Q17	QUADRUP	129.8751	0.3	0	0.08664	0	2.889985
Q18	QUADRUP	142.5554	0.3	0	-0.0867	0	-2.89195
Q19	QUADRUP	155.2358	0.3	0	0.08664	0	2.889985
Q20	QUADRUP	167.9161	0.3	0	-0.0867	0	-2.89195
Q21	QUADRUP	180.5967	0.3	0	0.09229	0	3.078469
Q22	QUADRUP	193.2104	0.3	0	-0.18116	0	-6.04279
DIP2	SBEND	198.2411	1.1	-0.12664	0	-1.15202	0
Q23	QUADRUP	199.3487	0.3	0	0.420247	0	14.01793
DIP3	SBEND	201.2213	1.1	-0.12664	0	-1.15202	0
Q24	QUADRUP	202.5945	0.3	0	-0.81872	0	-27.3096
Q25	QUADRUP	205.0397	0.3	0	0.669533	0	22.33322
Q26	QUADRUP	206.7853	0.3	0	-0.59886	0	-19.9759
Q27	QUADRUP	214.5232	0.3	0	0.645192	0	21.5213
Q28	QUADRUP	215.1837	0.3	0	-0.83608	0	-27.8887
DC	SBEND	216.9834	1.2	0.166	0	1.384291	0
LAM	SBEND	218.5834	1	0.08727	0	0.873304	0

## Динамика пучка в накопителе

А.В. Акимов<sup>1</sup>, Ю.С. Актершев<sup>1</sup>, В.В. Анашин<sup>1</sup>, А.В. Андрианов<sup>1</sup>, О.В. Анчугов<sup>1</sup>, М.В. Арсентьева, П.А. Бак<sup>1</sup>, Г.Н. Баранов<sup>1,2</sup>, А.М. Барняков<sup>1</sup>, А.М. Батраков<sup>1</sup>, О.В. Беликов<sup>1</sup>, Л.Л. Белова<sup>1</sup>, Е.А. Бехтенов<sup>1</sup>, В.И. Бухтияров<sup>3</sup>, А.В. Богомятков<sup>1,2</sup>, В.М. Борин<sup>1</sup>, Д.Б. Буренков<sup>1,2</sup>, Д.С. Винник<sup>1</sup>, В.Н. Волков<sup>1</sup>, Е.С. Вонда<sup>1</sup>, К.М. Горчаков<sup>1</sup>, К.А. Гришина<sup>1</sup>, Д.С. Гуров<sup>1</sup>, С.М. Гуров<sup>1</sup>, Г.А. Гусев<sup>1</sup>, Б.А. Довженко<sup>1</sup>, В.Л. Дорохов<sup>1,2</sup>, Е.Н. Дементьев<sup>1</sup>, А.И. Ерохин<sup>1</sup>, А.А. Жариков<sup>1</sup>, К.В. Жиляев<sup>1</sup>, А.А. Жуков<sup>1</sup>, А.Н. Журавлев<sup>1,2</sup>, К.В. Золотарев<sup>1,2</sup>, Н.А. Золотухина<sup>1</sup>, Я.В. Зубавичус<sup>2,3</sup>, С.Е. Карнаев<sup>1</sup>, Г.В. Карпов<sup>1</sup>, К.Ю. Карюкина<sup>1,2</sup>, В.Д. Кашкин<sup>1</sup>, В.А. Киселев<sup>1</sup>, В.В. Кобец<sup>1</sup>, Е.С. Котов<sup>1</sup>, В.Я. Корчагин<sup>1</sup>, А.А. Краснов<sup>1,2</sup>, В.С. Крапивин<sup>1</sup>, С.А. Крутихин<sup>1</sup>, В.С. Кузьминых<sup>1</sup>, Г.Н. Кулипанов<sup>1,2</sup>, И.В. Купцов<sup>1</sup>, Г.Я. Куркин<sup>1</sup>, А.Е. Левичев<sup>1,2</sup>, Е.Б. Левичев<sup>1,2</sup>, Д.В. Лешонок (Дорохова)<sup>1,2</sup>, П.В. Логачев<sup>1</sup>, Ю.И. Мальцева<sup>1</sup>, Ма Сяо Чао<sup>1</sup>, Н.А. Мезенцев<sup>1,2</sup>, О.И. Мешков<sup>1</sup>, Н.В. Митянина<sup>1</sup>, И.А. Морозов<sup>1,2</sup>, А.А. Морсин<sup>1</sup>, С.А. Никитин<sup>1</sup>, Д.А. Никифоров<sup>1</sup>, В.К. Овчар<sup>1</sup>, И.Н. Окунев<sup>1,2</sup>, А.В. Павленко<sup>1</sup>, О.А. Павлов<sup>1</sup>, А.Ю. Пахомов<sup>1</sup>, В.М. Петров<sup>1</sup>, С.Л. Пивоваров<sup>1</sup>, П.А. Пиминов<sup>1,2</sup>, А.В. Полянский<sup>1</sup>, Д.Н. Пурескин<sup>1</sup>, Д.Ф. Решетов<sup>1</sup>, В.В. Репков<sup>1</sup>, Е.А. Ротов<sup>1</sup>, Т.В. Рыбичкая<sup>1</sup>, С.Л. Самойлов<sup>1,2</sup>, И.К. Седяров<sup>1</sup>, А.М. Семенов<sup>1</sup>, Д.В. Сеньков<sup>1</sup>, Л.Е. Сердаков<sup>1</sup>, Ш.Р. Сигнатулин<sup>1</sup>, С.В. Синяткин<sup>1,2</sup>, М.А. Скамароха<sup>1,2</sup>, А.А. Старостенко<sup>1</sup>, А.Г. Трибендис<sup>1,2</sup>, А.В. Уткин<sup>1</sup>, М.Г. Федотов<sup>1</sup>, А.С. Цыганов<sup>1</sup>, А.Д. Чернякин<sup>1</sup>, И.Н. Чуркин<sup>1,2</sup>, С.В. Шиянков<sup>1</sup>, Д.А. Шведов<sup>1</sup>, В.А. Шкаруба<sup>1,2</sup>, К.С. Штро<sup>1</sup>, Н.С. Щегольков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, д. 11, 630090, г. Новосибирск

<sup>2</sup> ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, 630559, Кольцово

<sup>3</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090

Автор для переписки: [levichev@srf-skif.ru](mailto:levichev@srf-skif.ru)

**Аннотация.** Накопительное кольцо ЦКП «СКИФ» с энергией электронов 3 ГэВ предназначено для генерации интенсивных и ярких пучков синхротронного излучения из поворотных магнитов и из специальных источников излучения – «вставных устройств» (insertion devices) – магнитных периодических вигглеров и ондуляторов, которые размещаются в 14-ти длинных (6 м) прямолинейных промежутках. Еще два промежутка служат для организации инжекции пучка электронов из синхротрона-бустера и постановки ускоряющих резонаторов. Оптимизированная структура накопителя позволяет получить естественный (т.е., без учета токовых эффектов, связи бетатронных колебаний и влияния вставных устройств) горизонтальный эмиттанс  $\approx 75$  пм. Данный раздел описывает основные аспекты оптики и динамики пучка электронов в накопителе ЦКП «СКИФ».

**Ключевые слова:** оптика, накопитель ЦКП «СКИФ», динамика пучка электронов, коррекция орбиты, коллективные эффекты, импеданс, магнитная структура, обратная связь

## Оглавление

2.1	Магнитная структура источника СИ СКИФ .....	100
2.1.1	Обзор и общая конфигурация .....	100
2.1.2	Выбор базовой ячейки магнитной структуры .....	101
2.1.3	Структура и параметры накопителя .....	107
2.1.4	Возможности настройки структуры .....	110
2.1.5	Параметры магнитов .....	114
2.2	Коррекция хроматизма и нелинейная динамика .....	115
2.3	Влияние змеек и ондуляторов на динамику пучка .....	123
2.3.1	Опция магнитной структуры с вигглерами и с уменьшенным эмиттансом .....	130
2.4	Внутрисгустковое рассеяние .....	138
2.5	Коррекция орбиты и бетатронной связи .....	144
2.5.1	Ошибки выставки .....	145
2.5.2	Коррекция замкнутой орбиты пучка .....	145
2.5.3	Коррекция линейной связи бетатронных колебаний .....	148
2.6	Малые динамические смещения магнитных элементов .....	155
2.6.1	Динамические смещения магнитов накопителя электронов .....	155
2.6.2	Система обратной связи (FOFB, Fast Orbit Feedback) .....	158
2.7	Коллективные эффекты .....	161
2.7.1	Расчет импедансов .....	163
2.7.2	Резистивная и когерентная неустойчивости .....	168
2.7.3	Микроволновая неустойчивость .....	169
2.8	Инжекция пучка в накопитель .....	171
	Список цитируемой литературы .....	178

## 2.1 Магнитная структура источника СИ СКИФ

### 2.1.1 Обзор и общая конфигурация

Внешние ограничения (жесткие сроки реализации, ресурсы и т.д.) и задачи экспериментальной программы определили основные характеристики ускорительного комплекса источника СИ четвертого поколения СКИФ следующим образом:

- Энергия пучка 3 ГэВ.
- Натуральный (без учета бетатронной связи, токовых эффектов, влияния змеек и ондуляторов и т.д.) горизонтальный эмиттанс  $\epsilon_{x0} \leq 100$  пм.
- Периметр накопителя  $P \leq 500$  м.

Одним из основных требований к источнику СИ СКИФ является короткий период изготовления. При столь малом заданном эмиттансе, выбранная энергия 3 ГэВ позволяет, по сравнению с более высокой, сделать кольцо короче и использовать наработки ИЯФ СО РАН по инжекционному комплексу, состоящему из линейного ускорителя с энергией 150÷200 МэВ [1] и бустерного синхротрона на полную энергию [2]. Все эти факторы способствуют ускорению реализации проекта.

Для исследований в области жесткого рентгеновского излучения планируется широко использовать сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы, в создании которых ИЯФ является одним из признанных мировых лидеров [3].

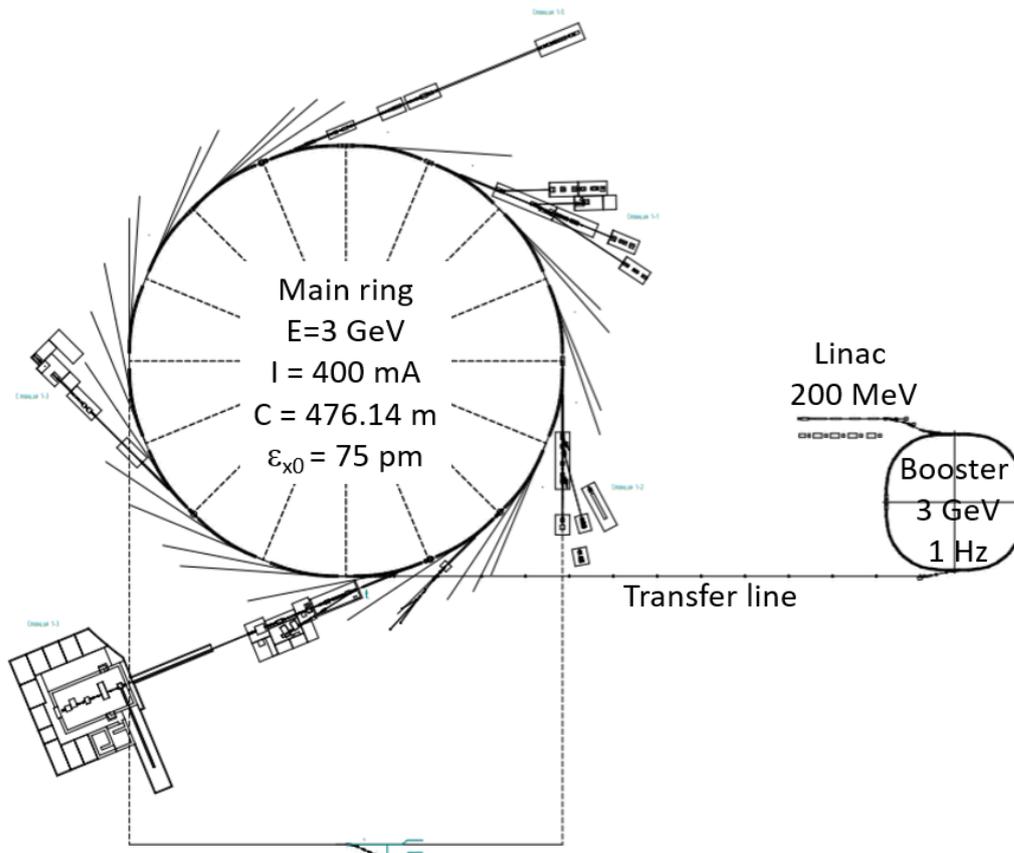


Рисунок 2.1.1.1. Конфигурация и характеристики источника СИ четвертого поколения СКИФ. Кроме основных установок ускорительного комплекса показан ряд экспериментальных станций.

Перечисленные соображения определили конфигурацию (**Рисунок 2.1.1.1**) и основные характеристики источника СИ СКИФ, который состоит из линейного ускорителя – фор-инжектора, бустерного синхротрона с длиной орбиты 158.7 м и частотой повторения инжекционного цикла 1 Гц, и основного кольца с периметром 476.14 м и 16-ю прямолинейными промежутками длиной 6 м. В двух промежутках планируется разместить ускоряющие резонаторы и оборудование инжекции, а оставшиеся 14 использовать для постановки «вставных устройств» – вигглеров и ондуляторов. Магнитная структура типа МВА (Multi-Bend Achromat) всех 16-ти суперпериодов идентична. Элементарная ячейка базируется на одном магните со слабым поперечным отрицательным градиентом. В каждом из суперпериодов один из магнитов (в центральной ячейке) выполнен с большим полем 2 Т, что позволяет выводить из него излучение с достаточно жестким спектром. Натуральный горизонтальный эмиттанс в таком кольце получился чуть меньше 75 пм.

Особое внимание уделялось простоте и высокой повторяемости (серийности) магнитных элементов, что также должно способствовать скорости реализации комплекса. В структуре не используются магниты с продольным градиентом поля [4]. Поперечный градиент в поворотных магнитах мал (около  $-10$  Т/м), что делает их простыми в изготовлении, измерении и настройке. Диполь с большим полем сделан с плоскими полюсами на постоянных магнитах и со слабой корректирующей токовой обмоткой. Магниты с обратной кривизной орбиты (т.н. «reverse bend»), способствующие минимизации эмиттанса [5], представляют собой смещенные поперечно короткие квадрупольные линзы, не требующие для оптимизации и изготовления сложных технологических подходов. Число типов магнитных элементов сведено к минимуму. Так, для получения динамической апертуры и энергетического акцептанса, достаточных для требуемого времени жизни пучка и простой, эффективной инжекции, используется всего два семейства секступольных линз.

## 2.1.2 Выбор базовой ячейки магнитной структуры

Главным критерием эффективности источника СИ является яркость – плотность потока фотонов в фазовом пространстве источника в единицу времени. Основным способом повышения яркости источника является уменьшение поперечного фазового объема (эмиттанса) электронного пучка, который определяется равновесием между радиационным трением и квантовой раскачкой бетатронных колебаний. Пусть магнитная структура накопителя электронов состоит из последовательности одинаковых поворотных магнитов с углом поворота  $\phi$ , тогда горизонтальный эмиттанс записывается как

$$\varepsilon_x = F \frac{c_q \gamma^2}{J_x} \phi^3, \quad (2.1.2.1)$$

где  $\gamma \gg 1$  – релятивистский фактор,  $J_x \approx 1 \div 2$  – безразмерный декремент затухания бетатронных колебаний,

$$c_q = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} \approx 0.3832 \text{ пм},$$

а фактор  $F$  – зависит от типа магнитной структуры и успеха ее оптимизации.

Для магнита с однородным полем функция  $F$  минимальна, когда горизонтальные бета-тронная  $\beta_x$  и дисперсионная  $\eta$  функции достигают в центре магнита определенных значений, зависящих от его длины  $L$  и угла поворота  $\phi$ ,

$$\eta_{min} = \frac{L\phi}{24}, \quad \beta_{xmin} = \frac{L}{2\sqrt{15}}. \quad (2.1.2.2)$$

Такая конфигурация называется ТМЕ (Theoretical Minimum Emittance) [6], и для нее

$$F_{TME} = \frac{1}{12\sqrt{15}}. \quad (2.1.2.3)$$

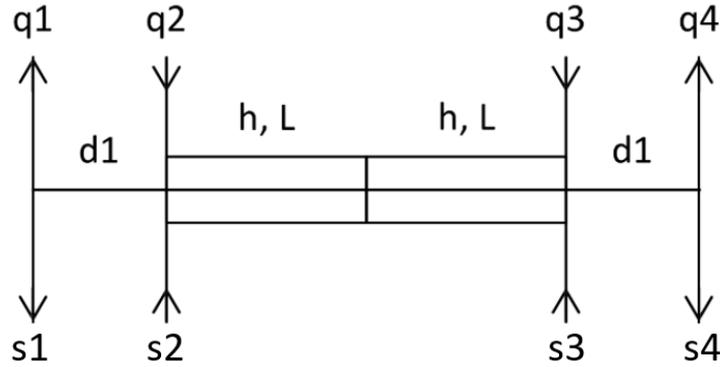
Сложность заключается в том, что получить на практике условия для минимального эмиттанса, приемлемую длину ячейки (чтобы все кольцо не было слишком длинным и дорогим), разумные (технически достижимые) силы квадрупольных и секступольных линз, достаточную поперечную и продольную динамическую апертуру, оказывается невозможным, и реальное решение является приближением ТМЕ. Чтобы получить в такой простейшей ячейке, построенной вокруг расположенного в центре поворотного магнита, периодическое оптическое решение, нужно, минимально, две пары линз, расположенных слева и справа от магнита. Именно такая ячейка и является наиболее распространенной для источников СИ четвертого поколения.

Получение малого значения  $F$  неизбежно приводит к ужесточению фокусировки, увеличению натурального хроматизма, который приходится компенсировать сильными секступольными линзами. Кроме технических сложностей создания таких сильнополевых магнитов имеется более фундаментальная проблема – нелинейное движение ограничивает область устойчивых колебаний частицы (динамическую апертуру). Уменьшение (шестимерной) динамической апертуры является основной сложностью при разработке магнитной структуры накопителя электронов с малым эмиттансом.

Требования к базовой ячейке СКИФ формулируются следующим образом:

- Малый эмиттанс  $< 100$  пм.
- Компактность (от этого зависит общая длина кольца и, в конечном итоге, стоимость). Однако расстояние между магнитами ячейки должно быть достаточным для размещения необходимого оборудования (корректоров, датчиков положения пучка, сильфонов, фланцев и т.д.).
- Параметры магнитов (поля, градиенты) должны быть технически реализуемы для «стандартных» (проверенных, дешевых) технологий, должны обеспечивать надежность конструкции, качество магнитного поля, темп производства магнитов и т.п.
- Динамическая апертура ячейки должна быть достаточной как для получения требуемого времени жизни пучка ( $\geq 5$  часов) с учетом внутрисгусткового рассеяния при номинальном токе 400 мА, так и для обеспечения испытанных и проверенных вариантов инъекции.

Рассмотрим упрощенную модель магнитной ячейки, показанную на **Рисунке 2.1.2.1**.



**Рисунок 2.1.2.1.** Модель ячейки магнитной структуры с малым эмиттансом.

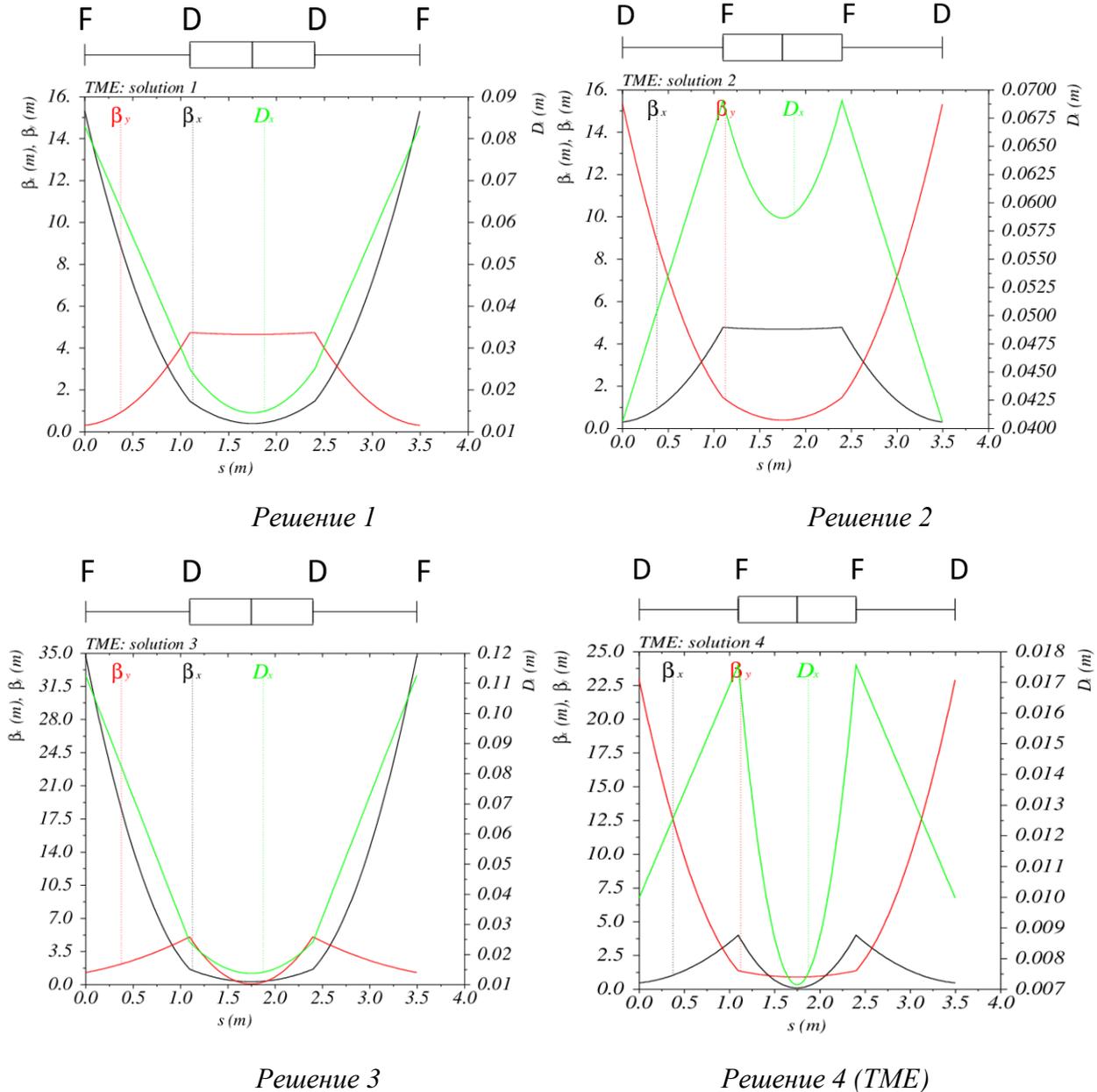
В центре расположен поворотный магнит длиной  $2L$  с кривизной орбиты  $h = B/B\rho$ , где  $B\rho$  – магнитная жесткость. Слева и справа зеркально относительно центра магнита размещаются «тонкие» квадрупольные  $q_{1,2} = q_{4,3} = (B'l)_{1,2}/B\rho$  и секступольные  $s_{1,2} = s_{4,3} = (B''l)_{1,2}/B\rho$  линзы с промежутком длиной  $d_1$  между ними. Полная длина ячейки  $L_c = 2(L + d_1)$ .

Как показывают теоретические исследования, подтверждающиеся результатами моделирования, для ячейки с **Рисунка 2.1.2.1** имеются две области устойчивости  $\nu_{x,y} = \{0 \div 0.5\}, \{0.5 \div 1\}$ . Для каждой области устойчивости возможны, вообще говоря, две конфигурации квадрупольных линз  $q_1 q_2 q_3 q_4 = FDDF$  и  $q_1 q_2 q_3 q_4 = DFFD$ . Периодические решения получаются не для всех возможных комбинаций, а только для четырех, чье типичное поведение оптических функций показано на **Рисунке 2.1.2.2**. Минимальный эмиттанс (ТМЕ), отвечающий выражениям (2.1.2.2) и (2.1.2.3), соответствует четвертому решению.

Поскольку нашей целью является выбор параметров базовой ячейки источника СИ СКИФ, нас, кроме малого эмиттанса, интересуют необходимые для его получения силы квадрупольных и секступольных линз. И те, и другие хочется иметь поменьше, как с точки зрения технической реализации магнитов, так (это касается секступольных линз) и для получения большой динамической апертуры.

Результаты анализа, проведенные для ячейки с одинаковыми параметрами, скомпенсированным натуральным хроматизмом и (приблизительно) минимальным эмиттансом для каждого из четырех решений приведены в **Таблице 2.1.2.1**.

Для второго решения дисперсионная функция в магните велика и минимальный эмиттанс слишком большой. Для первого и третьего – эмиттанс всего в два раза больше минимального, что можно исправить уменьшив (примерно на 30%) угол поворота, однако из-за большей вертикальной фокусировки соответствующая секступольная линза для третьего решения в несколько раз сильнее, чем для первого. Четвертое решение, хоть и дает минимальный эмиттанс, но имеет секступоли в  $\sim 5 \div 7$  раз сильнее, чем для первого, и в несколько раз меньшую динамическую апертуру (как показывает моделирование).



**Рисунок 2.1.2.2.** Четыре периодических решения для магнитной ячейки с Рисунок 2.1.2.1. F и D обозначают фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы. Решение 4 соответствует минимально достижимому эмиттансу (TME).

**Таблица 2.1.2.1.** Анализ решений для ячейки с Рисунок 2.1.2.1.

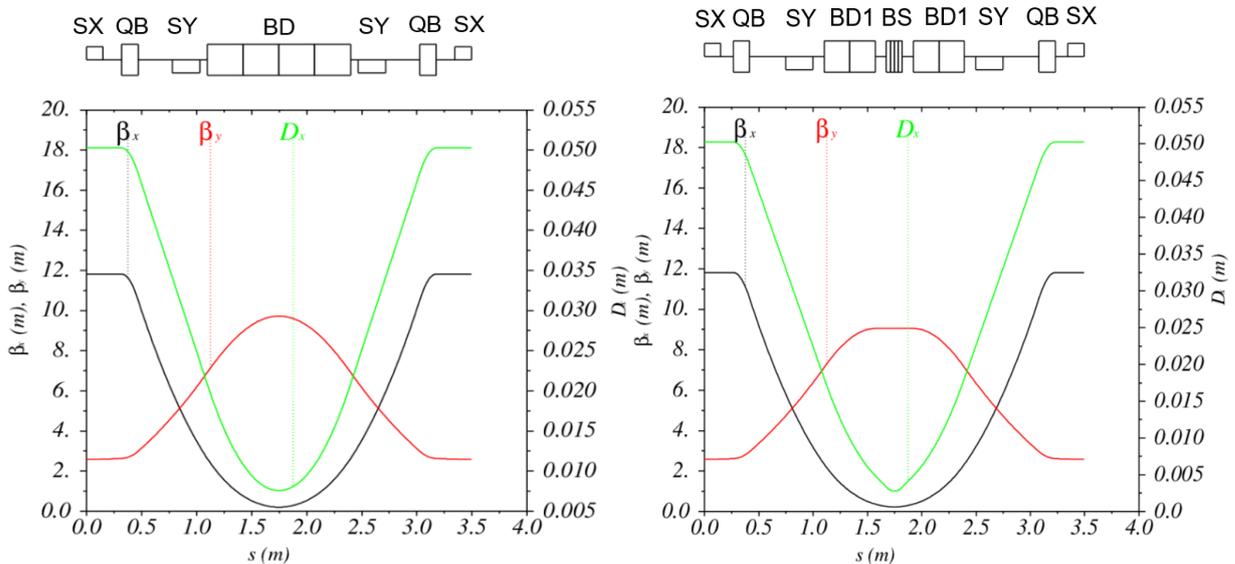
№	$\nu_x$	$\nu_y$	$q_1 q_2 q_2 q_1$	Примечание
1	0÷0.5	0÷0.5	FDDF	$\epsilon_{x1min} \approx 2\epsilon_{xTME}$ , квадруполь и секступоль слабые <sup>*)</sup> .
2	0÷0.5	0÷0.5	DFFD	$\epsilon_{x2min} \approx 10\epsilon_{xTME}$
3	0÷0.5	0.5÷1	FDDF	$\epsilon_{x3min} \approx 2\epsilon_{xTME}$ . Сильный вертикальный секступоль.
4	0.5÷1	0÷0.5	DFFD	Эмиттанс $\epsilon_{xTME}$ . Очень сильные секступоль.

<sup>\*)</sup> По отношению к трем другим решениям.

На основе сделанного анализа для источника СИ СКИФ мы, в качестве базовой, выбрали магнитную ячейку, отвечающую решению 1, для которого есть возможность достичь

малого эмиттанса при небольших размерах кольца, а (относительно) слабые секступольные линзы позволяют надеяться получить большую динамическую апертуру.

Ячейка магнитной структуры, аналогичная изображенной на **Рисунке 2.1.2.1**, неоднократно изучалась ранее (см., например, [6-11]), в т.ч., в конфигурации решения 1. Так в [9] этот вариант (который авторы назвали *simplified TME* – «упрощенный TME») предлагался для создания источника СИ с эмиттансом, ограниченным дифракционными эффектами. В [10] такая ячейка исследовалась подробно (под названием *modified TME* – «модифицированная TME»; мы будем использовать ниже именно это название – *mTME*), причем упоминалось, что диапазон бетатронной частоты для *mTME*  $\nu_x < 0.5$  (в отличие от «истинной» TME, где  $\nu_x > 0.5$ ). В [11] такой ячейке было дано название *relaxed TME*.



**Рисунок 2.1.2.3.** Базовая ячейка магнитной структуры источника СКИФ – слева. Ячейка с сильным центральным магнитом (BS) – справа.

Взяв за основу ячейку *mTME* мы внесли в нее некоторые изменения (левый **Рисунок 2.1.2.3**):

- Для уменьшения длины ячейки отрицательный градиент двух линз  $q_2$  введен в поворотный магнит.
- Для лучшей подгонки дисперсионной функции фокусирующие квадрупольные линзы  $q_1$  слегка сдвинуты по горизонтали (*reverse bend* [5]). Появление магнитов с совмещенными дипольной и квадрупольной компонентой позволило изменять горизонтальный декремент  $J_x$ .
- Силы и относительное размещение элементов было численно оптимизировано с целью увеличения динамической апертуры, минимизации эмиттанса, натурального хроматизма и настройки горизонтального декремента  $J_x \approx 2$ .

Ячейка зеркально симметрична относительно центра, где расположен дипольный магнит BD с небольшим отрицательным градиентом, обеспечивающим вертикальную фокусировку. Две квадрупольные линзы QB фокусируют пучок горизонтально и, будучи слегка смещенными по радиусу, поворачивают пучок в обратном, по сравнению с основным магнитом, направлении (*reverse bend*), способствуя более точной подстройке дисперсии к оптимальному

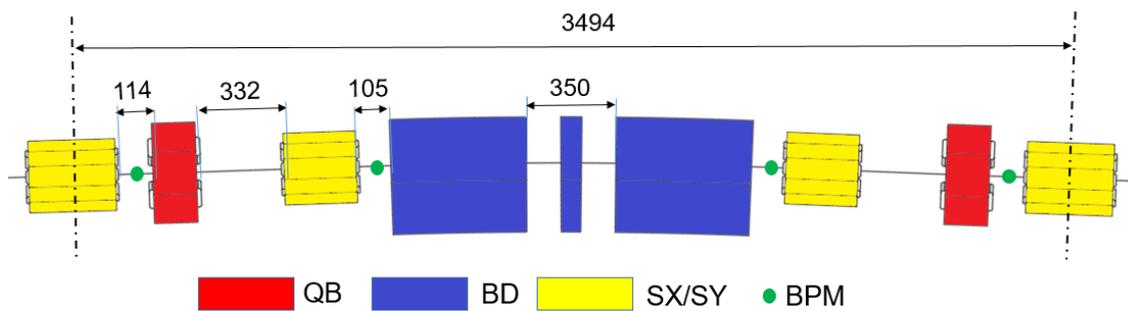
значению и уменьшению эмиттанса. Две секступольные линзы SY и одна SX (ею ячейка начинается и заканчивается) корректируют линейный хроматизм бетатронных частот.

Малый угол поворота ячейки, необходимый для минимизации эмиттанса, подразумевает слабое магнитное поле центрального диполя (0.55 Т в нашем случае), что является недостатком с точки зрения генерации жесткого рентгеновского излучения. Для устранения этого недостатка в центральной ячейке каждого суперпериода диполь BD со слабым полем длиной 1.3 м заменен на секцию из трех магнитов: по краям два коротких слабых с небольшим отрицательным градиентом BD1, а между ними диполь BS с плоскими полюсами и полем 2 Т (Рисунок 2.1.2.3 справа). Длина такой ячейки совпадает с длиной регулярной ячейки (около 3.5 м). Параметры магнитных элементов слегка отличаются от параметров регулярной ячейки. Для краткости будем обозначать ячейки LF (low field) и HF (high field) соответственно. Расстояние между магнитными элементами в обеих ячейках представляются достаточными для размещения вакуумного, диагностического и другого оборудования ускорителя.

Рисунок 2.1.2.4 показывает компоновку обеих ячеек периодичности. В Таблице 2.1.2.2 перечислены основные параметры ячеек; они получены из периодического решения для одной ячейки (замкнутой на себя).



(а) Компоновка ячейки LF со слабым магнитом.



(б) Компоновка ячейки HF с сильным магнитом

Рисунок 2.1.2.4. Компоновка элементов ячейки. Размеры даны по магнитным длинам.

**Таблица 2.1.2.2.** Основные параметры ячеек периодичности накопителя СКИФ.

Параметр	LF	HF
Длина $L_s$ , м	3.4948	3.4948
Угол поворота $\phi$	$3.682^\circ$	$3.642^\circ$
Бетатронные частоты $\nu_x/\nu_y$	0.440/0.142	0.436/0.14
Кэфф. уплотнения обр $\alpha$	$1.4 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-5}$
Горизонтальный эмиттанс $\epsilon_x$ , пм	70	75
Энергетический разброс $\sigma_E/E$	$9.9 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-3}$
Потери энергии за оборот $U_0$ , кэВ	4.77	9.83
Декременты затухания $J_x/J_s$	2.25/0.75	1.71/1.29
Натуральный хроматизм $\xi_x/\xi_s$	-1.2/-0.35	-1.16/-0.32

### 2.1.3 Структура и параметры накопителя

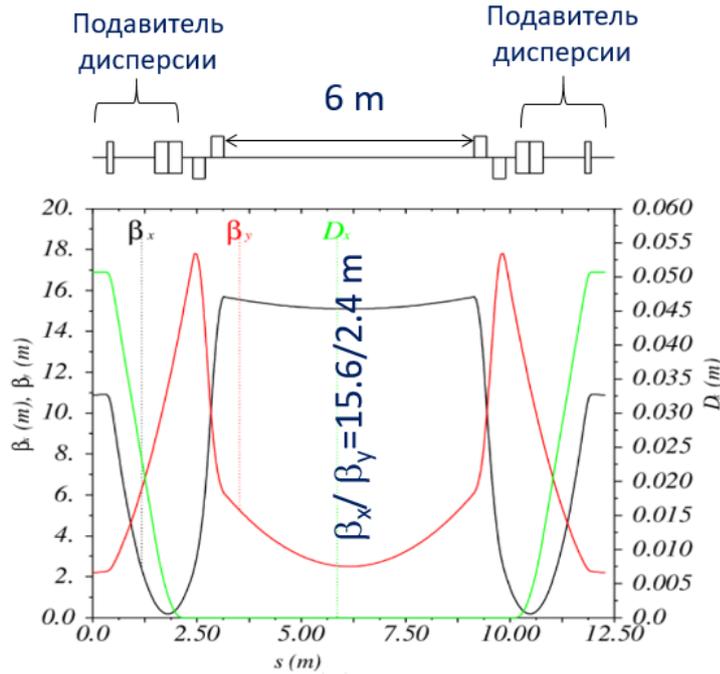
Магнитная структура СКИФ состоит из 16-ти суперпериодов типа 7BA с пятью регулярными ячейками mTME, описанными выше, и двумя, на краях суперпериода, для зануления дисперсионной функции в прямолинейном промежутке длиной 6 м (отсчитывается между краями магнитного поля линз). Промежуток и секции зануления дисперсии (dispersion suppressor) показаны на **Рисунок 2.1.3.1**. Два дублета квадрупольных линз настраивают в центре промежутка достаточно большую  $\beta_x$  (для оптимизации горизонтальной инжекции) и достаточно малую  $\beta_y$  (для уменьшения влияния змеек и ондуляторов с вертикальным полем на динамику пучка). Такая, наиболее простая, конфигурация прямолинейного промежутка считается базовой; более сложные варианты обсуждаются ниже. Компоновка прямолинейного промежутка приведена на **Рисунке 2.1.3.2**.

Магнитная структура суперпериода, начинающаяся и кончающаяся в центре прямолинейного промежутка, показана на **Рисунке 2.1.3.3**. Структуру отличает высокая периодичность поведения оптических функций, которая способствует большой серийности магнитных элементов.

В **Таблице 2.1.3.1** приведены основные параметры всего накопительного кольца.

Магнитная структура, показанная на **Рисунке 2.1.3.3**, проста, удовлетворяет основным требованиям, предъявленным выше, обладает высокой степенью симметрии и, следовательно, минимальным числом структурных бетатронных резонансов, и т.д. Оптические функции в прямолинейном промежутке (нулевая дисперсионная, большая горизонтальная бета и малая вертикальная) хорошо подходят для традиционной схемы инжекции в горизонтальной плоскости, размещения ускоряющих резонаторов и генераторов СИ, которые, из-за малой вертикальной бетатронной функции, слабо возмущают оптику кольца.

Чертеж суперпериода с магнитами, размещенными на подставках и с каналами вывода СИ приведен на **Рисунке 2.1.3.4**.



**Рисунок 2.1.3.1.** Магнитная структура секций подавления дисперсии (dispersion suppressor) и прямолинейного промежутка.

**Таблица 2.1.3.1.** Основные параметры структуры с Рисунок 2.1.3.3.

Энергия пучка, ГэВ	3
Симметрия	16
Периметр, м	476.14
Период обращения, мс	1.588
Частота обращения, МГц	0.6296
Горизонтальный эмиттанс, пм	73.2
Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-3}$
Потери на оборот, кэВ	536
Бетатронные частоты, (x/y)	50.806 / 18.84
Коэффициент уплотнения орбит	$7.64 \cdot 10^{-5}$
Натуральный хроматизм, (x/y)	-149/-55
Гармоника ВЧ-резонатора	567
Частота ВЧ, МГц	357
Напряжение ВЧ, МВ	0.77
Энергетический акцептанс	2.6 %
Синхротронная частота	$1.13 \cdot 10^{-3}$
Длина сгустка, мм	5.3
Радиационные числа, (x/e)	1.94/1.06
Время затухания, (x/e), мс	9.2/16.7

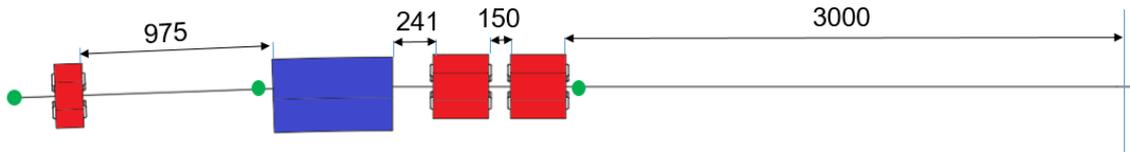


Рисунок 2.1.3.2. Компоненка прямолинейного промежутка и секции зануления дисперсионной функции (показана половина).

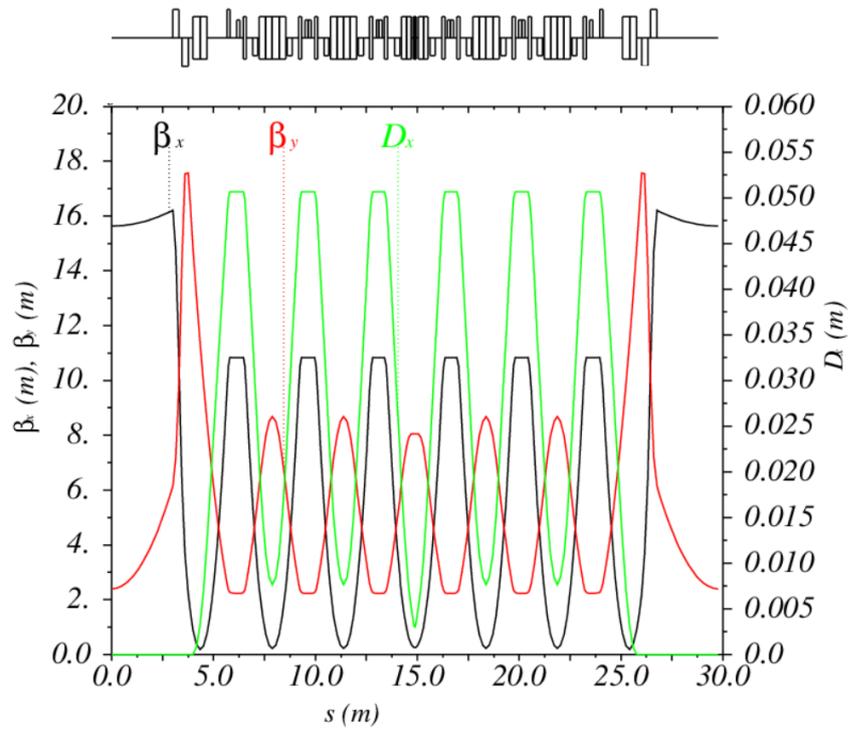


Рисунок 2.1.3.3. Структура и оптические функции суперпериода СКИФ.

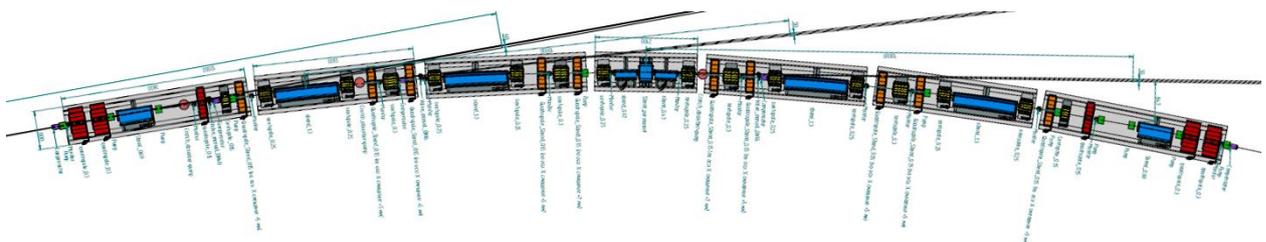
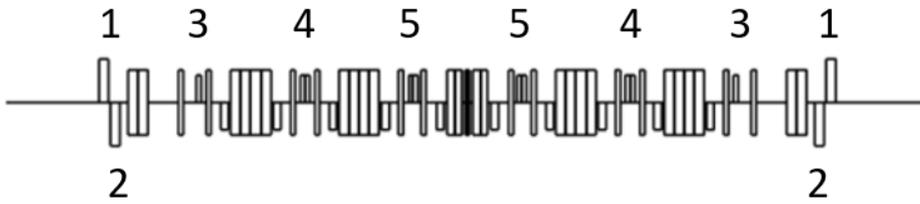


Рисунок 2.1.3.4. Вид в плане на размещение магнитов и каналов вывода излучения суперпериода источника СИ СКИФ.

### 2.1.4 Возможности настройки структуры

Для того, чтобы знать возможности настройки магнитной структуры источника СИ СКИФ (или, наоборот, последствия систематических ошибок в градиенте различных квадрупольных линз), мы варьировали градиент пар линз, расположенных симметрично относительно центра суперпериода на  $\pm 1\%$  и исследовали искажение оптических функций и параметров пучка, вызванных таким изменением. Размещение и нумерация линз, используемая в этом параграфе, показаны на **Рисунке 2.1.4.1**.

Ниже приведены результаты исследований; бетатронные частоты и натуральный хроматизм даются в пересчете на один суперпериод.



**Рисунок 2.1.4.1.** Линзы, используемые для настройки оптики.

**Линза 1.** Искажение оптических функций показано на **Рисунке 2.1.4.2**, изменение параметров – в **Таблице 2.1.4.1**.

**Линза 2.** Искажение оптических функций показано на **Рисунке 2.1.4.3**, изменение параметров – в **Таблице 2.1.4.2**.

**Линза 3.** Искажение оптических функций показано на **Рисунке 2.1.4.4**, изменение параметров – в **Таблице 2.1.4.3**.

**Линза 4.** Искажение оптических функций показано на **Рисунке 2.1.4.5**, изменение параметров – в **Таблице 2.1.4.4**.

**Линза 5.** Искажение оптических функций показано на **Рисунке 2.1.4.6**, изменение параметров – в **Таблице 2.1.4.5**.

**Таблица 2.1.4.1.** Изменение параметров пучка при вариации первой линзы на  $\pm 1\%$ .

1-я линза	Bare	+1 %	-1 %
Кoeff.уплотнения орбит	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.764 \cdot 10^{-4}$
Эмиттанс, пм	73.7	74.5	76.2
Бетатронные частоты (x/y)	3.175/ 1.177	3.203/1.162	3.143/1.193
Натуральный хроматизм (x/y)	-9.368/-3.492	-9.675/-3.456	-9.394/-3.539
$\beta_{x/y}$ в центре прям.промежутка, м	15.63/2.40	13.63/2.61	19.04/2.21

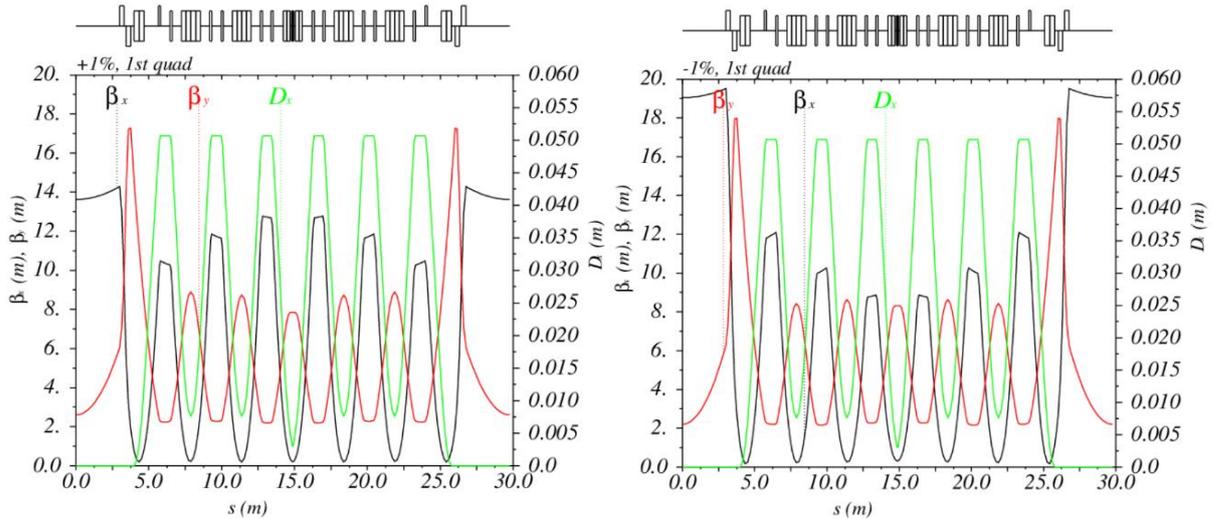


Рисунок 2.1.4.2. Оптические функции суперпериода при изменении градиента **первой** линзы на +1% (слева) и -1% (справа).

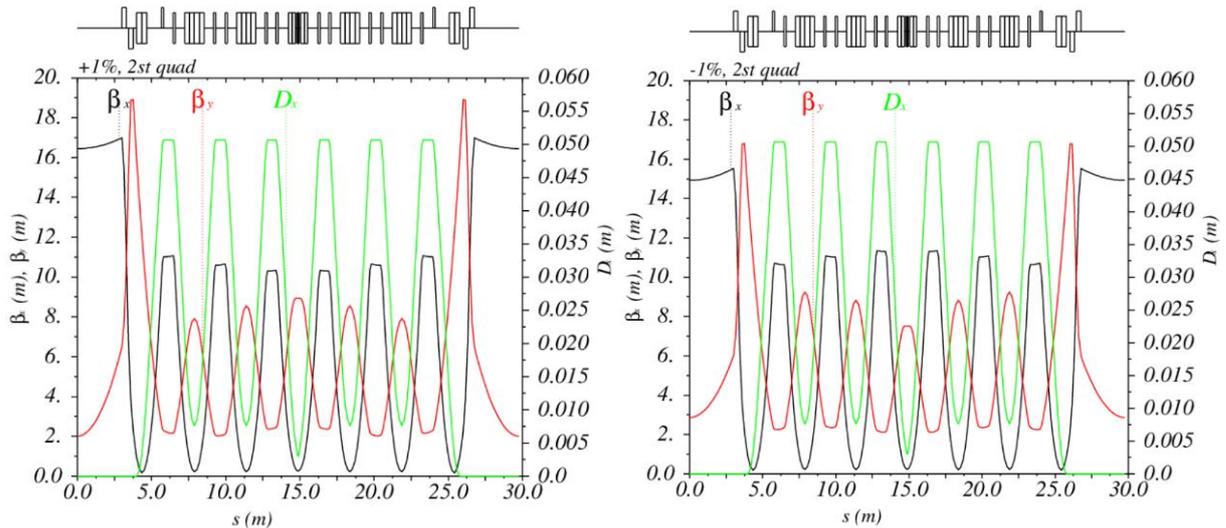


Рисунок 2.1.4.3. Оптические функции суперпериода при изменении градиента **второй** линзы на +1% (слева) и -1% (справа).

Таблица 2.1.4.2. Изменение параметров пучка при вариации **второй** линзы на  $\pm 1\%$ .

2-я линза	Варе	+1 %	-1 %
Коэфф.уплотнения орбит	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.764 \cdot 10^{-4}$
Эмиттанс, пм	73.7	73.9	73.7
Бетатронные частоты (x/y)	3.175/1.177	3.1669/1.215	3.183/1.142
Натуральный хроматизм (x/y)	-9.368/-3.492	-9.347/-3.658	-9.411/-3.389
$\beta_{x/y}$ в центре прям.промежутка, м	15.63/2.40	16.44/2.00	14.93/2.87

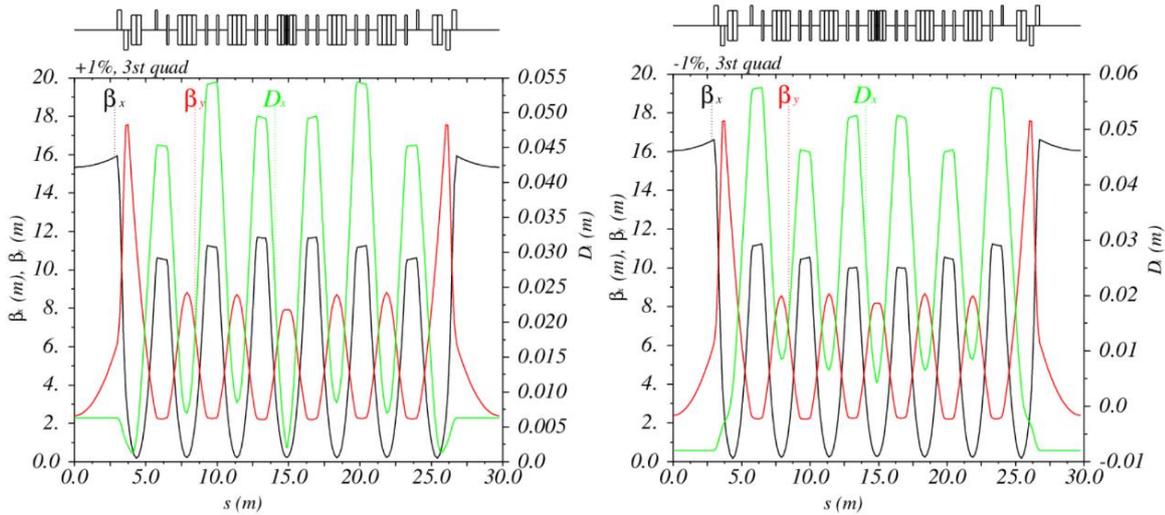


Рисунок 2.1.4.4. Оптические функции суперпериода при изменении градиента третьей линзы на +1% (слева) и -1% (справа).

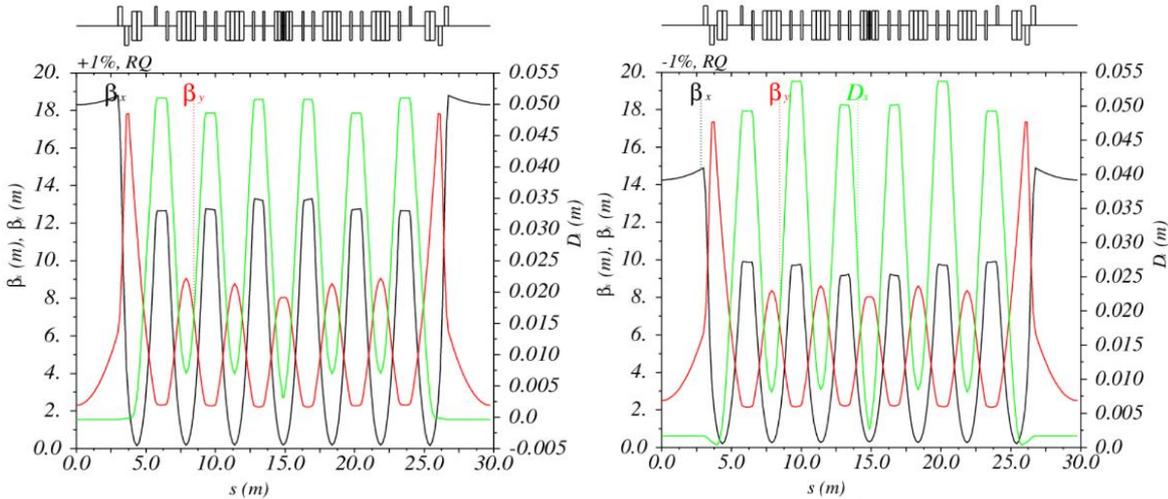
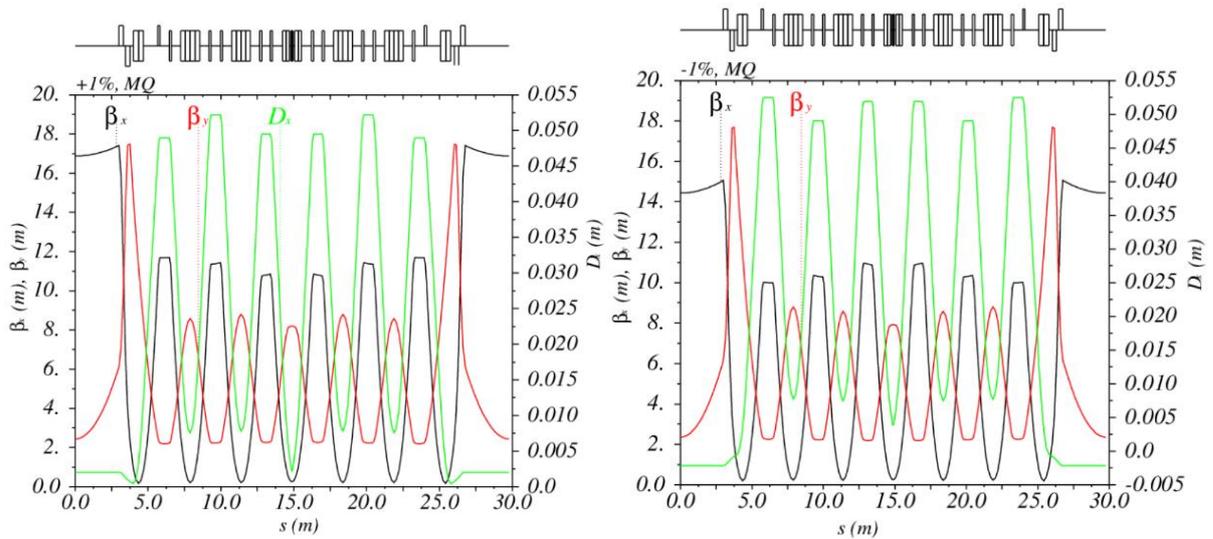


Рисунок 2.1.4.5. Оптические функции суперпериода при изменении градиента четвертой линзы на +1% (слева) и -1% (справа).

Таблица 2.1.4.3. Изменение параметров пучка при вариации третьей линзы на  $\pm 1\%$ .

3-я линза	Vare	+1 %	-1 %
Коэфф.уплотнения орбит	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.753 \cdot 10^{-4}$	$0.778 \cdot 10^{-4}$
Эмиттанс, пм	73.7	69.2	85
Бетатронные частоты (x/y)	3.175/1.177	3.187/1.175	3.163/1.180
Натуральный хроматизм (x/y)	-9.368/-3.492	-9.563/-3.497	-9.228/-3.489
$\beta_{x/y}$ в центре прям.промежутка, м	15.63/2.40	15.349/2.405	16.055/2.394
$\eta_x$ в центре прям.промежутка, см	0	0.63	-0.795



**Рисунок 2.1.4.6.** Оптические функции суперпериода при изменении градиента **пятой** линзы на +1% (слева) и –1% (справа).

**Таблица 2.1.4.4.** Изменение параметров пучка при вариации **четвертой** линзы на  $\pm 1\%$ .

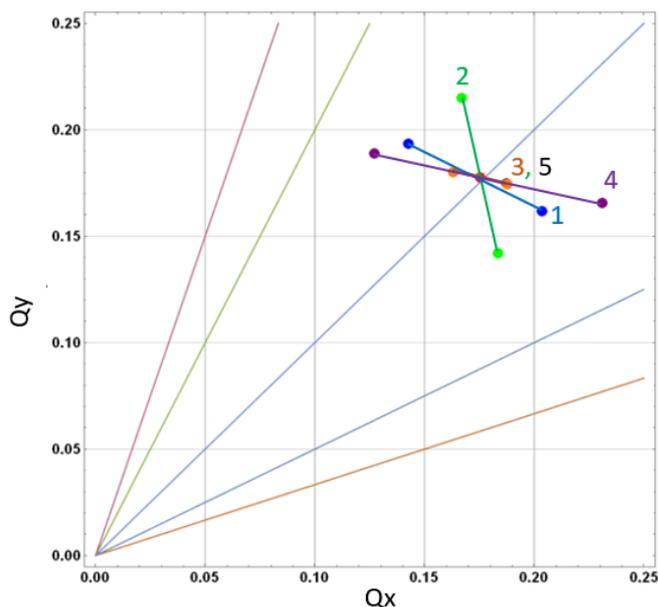
4-я линза	Vare	+1 %	-1 %
Коэфф.уплотнения орбит	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.714 \cdot 10^{-4}$	$0.816 \cdot 10^{-4}$
Эмиттанс, пм	73.7	71.9	76.4
Бетатронные частоты (x/y)	3.175/1.177	3.231/1.165	3.127/1.189
Натуральный хроматизм (x/y)	-9.368/-3.492	-11.170/-3.545	-8.305/-3.447
$\beta_{x/y}$ в центре прям.промежутка, м	15.63/2.40	18.299/2.303	14.26/2.49
$\eta_x$ в центре прям.промежутка, см	0	-0.038	0.16

**Таблица 2.1.4.5.** Изменение параметров пучка при вариации **пятой** линзы на  $\pm 1\%$ .

5-я линза	Vare	+1 %	-1 %
Коэфф.уплотнения орбит	$0.764 \cdot 10^{-4}$	$0.752 \cdot 10^{-4}$	$0.777 \cdot 10^{-4}$
Эмиттанс, пм	73.7	69.6	80.3
Бетатронные частоты (x/y)	3.175/1.177	3.188 /1.175	3.163/1.180
Натуральный хроматизм (x/y)	-9.368/-3.492	-9.859/-3.487	-8.916/-3.499
$\beta_{x/y}$ в центре прям.промежутка, м	15.63/2.40	16.88/2.44	14.43/2.36
$\eta_x$ в центре прям.промежутка, см	0	0.2	-0.21

Изменение рабочей точки на сетке частот при вариации градиента квадрупольных линз на  $\pm 1\%$  суммировано на **Рисунке 2.1.4.7**.

Проведенное исследование показывает, что небольшое изменение градиента квадрупольных линз позволяет достаточно эффективно изменять рабочую точку как по горизонтали, так и по вертикали. Результаты **Таблиц 2.1.4.3 и 2.1.4.5** подтверждают известный факт, что, делая в прямолинейном промежутке дисперсионную функцию отличной от нуля, можно добиться дальнейшего уменьшения эмиттанса пучка.



**Рисунок 2.1.4.7.** Девиация бетатронных частот при изменении градиента квадрупольных линз на  $\pm 1\%$ . Действие третьей и пятой квадрупольных линз совпадает.

## 2.1.5 Параметры магнитов

Параметры магнитных элементов структуры с **Рисунка 2.1.3.3** приведены в **Таблице 2.1.3.1**.

**2.1.3.1.** Приведенные мультипольные коэффициенты определяются обычным образом:

$$K_1 = \frac{G}{B\rho}, \quad K_2 = \frac{B''}{B\rho}.$$

**Таблица 2.1.5.1.** Параметры дипольных магнитов.

Магнит	Кол.	L, м	$\phi^\circ$	$\rho$ , м	B, Т	$K_1, m^{-2}$	G, Т/м
BD1	64	1.30	4.12	18.07	0.553	-0.791	-7.91
BD2	32	0.47	1.245	21.62	0.526	-1.074	-10.74
BM	32	0.69	2.079	19.01	0.526	-	-
BP	16	0.148	1.74	4.87	2.05	-	-

**Таблица 2.1.5.2.** Параметры квадрупольных магнитов.

Магнит	Кол.	L, м	$\phi^\circ$	$\rho$ , м	B, Т	$K_1, m^{-2}$	G, Т/м
QD	32	0.3	-	-	-	-4.456	-44.56
QF1	32	0.3	-	-	-	4.397	43.97
QF2	32	0.15	-	-	-	4.866	48.66
QF3	128	0.15	-0.221	-38.84	-0.257	5.152	51.52
QF4	32	0.15	-0.3	-28.66	-0.349	4.987	49.87

Таблица 2.1.5.3. Параметры секступольных магнитов.

Магнит	Кол.	L, м	$K_2, \text{м}^{-3}$	$B'', \text{Т/м}$
SF1	32	0.15	231.309	2313.09
SD	160	0.25	-237.939	-2379.39
SF2	64	0.3	231.309	2313.09

## 2.2 Коррекция хроматизма и нелинейная динамика

Линейный хроматизм структуры СКИФ в.8 ( $\xi_x/\xi_y$ ) = -149/-55 компенсируют два семейства секступольных линз, размещенные только в базовых ячейках периодичности, как показано на **Рисунке 2.2.1**.

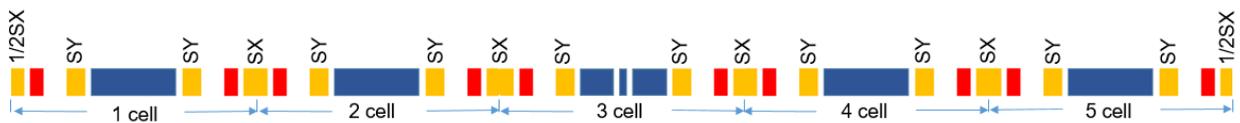


Рисунок 2.2.1. Схема размещения хроматических секступольных линз.

Таблица 2.2.1. Основные параметры хроматических секступолей СКИФ **в.8**.

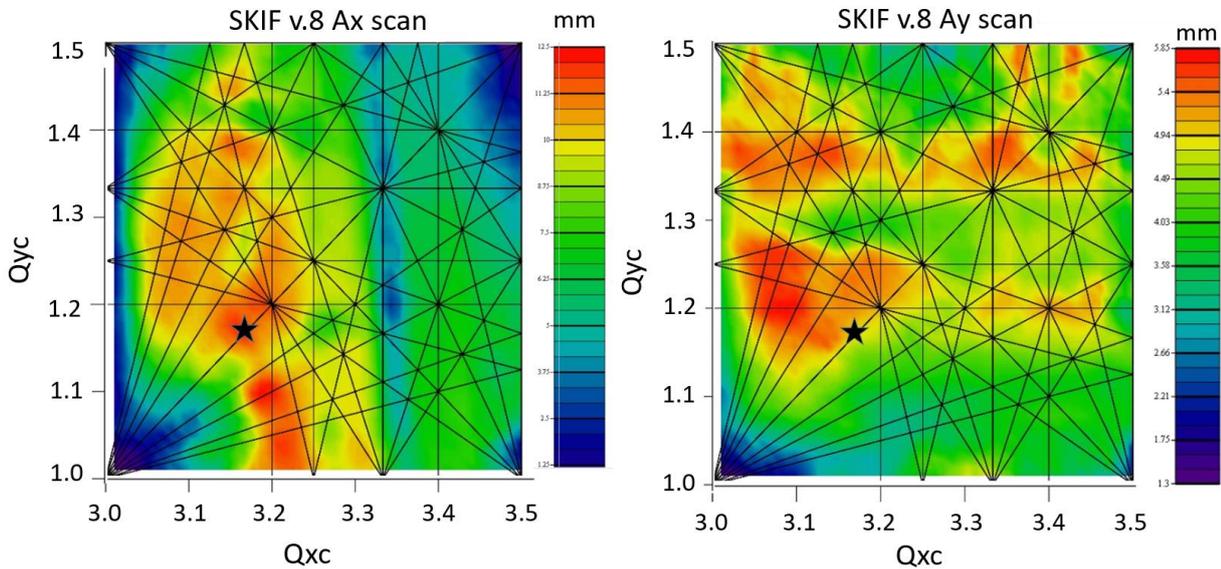
	$l, \text{м}$	$B''_{nom}, \text{Т/м}^2$	$(K_2 l)_{nom}, \text{м}^{-2}$	$B''_{max}, \text{Т/м}^2$	$(K_2 l)_{max}, \text{м}^{-2}$
SY	0.25	-2379	-59.48	-2800	-70
SX	0.30	2313	69.39	2800	84
1/2SX	0.15	2313	34.70	2800	42

Поскольку ячейка начинается и кончается горизонтальным секступолем, структура из пяти ячеек на концах имеет горизонтальный секступоль половинной длины (1/2SX). Расчетные параметры секступольных линз приведены в **Таблице 2.2.1**.

Размер области устойчивого нелинейного движения (динамическая апертура) зависит от мощности бетатронных резонансов и их расположения относительно выбранной точки частот. Поскольку теоретически оценить силу резонансов (особенно высоких порядков), обусловленных сильными секступольными линзами, корректирующими хроматизм, затруднительно, основным способом оптимизации динамической апертуры является численное моделирование движения частицы в нелинейном потенциале (трекинг). Для выявления резонансных областей в окрестности рабочей точки было проведено сканирование некоторых параметров накопителя: горизонтальной и вертикальной динамических апертур, энергетического акцептанса, эмиттанса и т.д. Для идеальной структуры без ошибок сетка резонансов определяется элементом периодичности (суперпериодом), для которого частоты  $\nu_{xc} = \nu_x/16 = 3.175$  и  $\nu_{yc} = \nu_y/16 = 1.178$ , поэтому мы ограничили область сканирования  $\nu_{xc} = 3.0 \div 3.5$  и  $\nu_{yc} = 1.0 \div 1.5$ . При перестройке бетатронной частоты градиент изменяется во всех элементах, где он предусмотрен, хроматизм компенсируется, дисперсионная функция в прямолинейном промежутке удерживается меньше 5 мм, а оптические функции в элементарных ячейках выравниваются (т.е., «биение» оптических функций минимизируется). Таким образом, каждой точке бетатронных частот соответствует пусть не совсем оптимизированная, но близкая к ней маг-

нитная структура. Предполагается, что в перспективных точках можно произвести более тонкую настройку. Моделирование проводилось для частицы с равновесной энергией программой MAD-8 [12] и проверялось программами Accelerator Toolbox (AT) [13] и Acceleraticum [14].

**Рисунок 2.2.2** показывает цветом размер динамической апертуры как функцию бетатронных частот. Красный цвет соответствует максимуму, синий – минимуму. В нашем случае, когда горизонтальная апертура слегка не симметрична относительно начала координат (см. **Рисунок 2.2.4**), на **Рисунке 2.2.2** показано меньшее по абсолютной величине значение горизонтальной динамической апертуры (отрицательное значение на **Рисунке 2.2.4**). При моделировании начальное значение вертикальной координаты устанавливалось малым ( $y_0 = 0.1$  мм), но не нулевым, чтобы движение было двумерным.

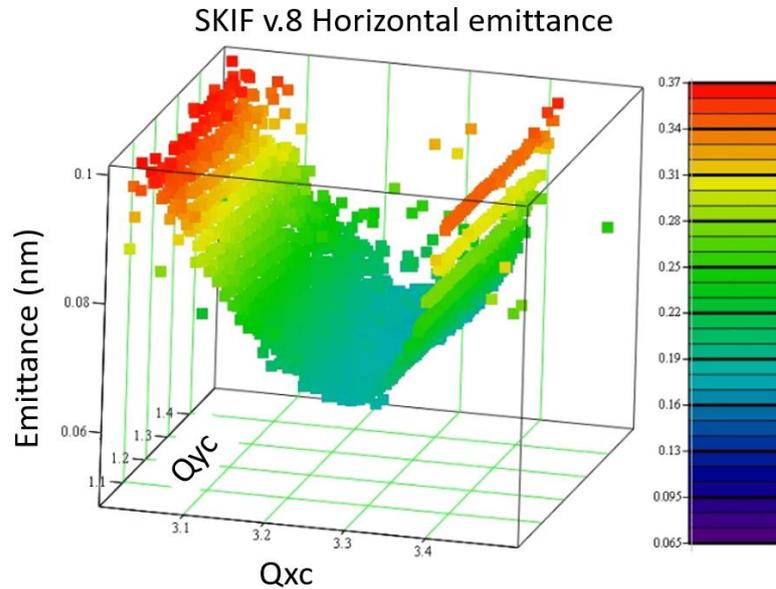


**Рисунок 2.2.2.** Горизонтальная (слева) и вертикальная (справа) динамическая апертура в зависимости от бетатронных частот одного суперпериода. Звездой показана рабочая точка, пунктирным прямоугольником – альтернативная область. Здесь и дальше динамическая апертура вычисляется в центре прямолинейного промежутка, где  $\beta_x = 15.6$  м,  $\beta_y = 2.4$  м.

На левом **Рисунке 2.2.2** отчетливо видны секступольные резонансы первого порядка приближения  $\nu_{xc} = 3$  и  $3\nu_{xc} = 10$ , в окрестности которых горизонтальная апертура падает до нуля, а также резонансы более высоких порядков, уменьшающие апертуру. Поскольку для источника СИ четвертого поколения вертикальный эмиттанс ограничен дифракционными эффектами на уровне  $\varepsilon_y \sim 10$  пм (для длины волны излучения  $\lambda \sim 1$  Å), и нет смысла добиваться очень малых значений коэффициента бетатронной связи ( $\kappa \approx 5 \div 10\%$  представляется достаточным), выбор рабочей точки вблизи разностного резонанса  $\nu_{xc} - \nu_{yc} = 2$  выглядит допустимым, и даже может быть полезным для получения (если понадобится) круглых пучков.

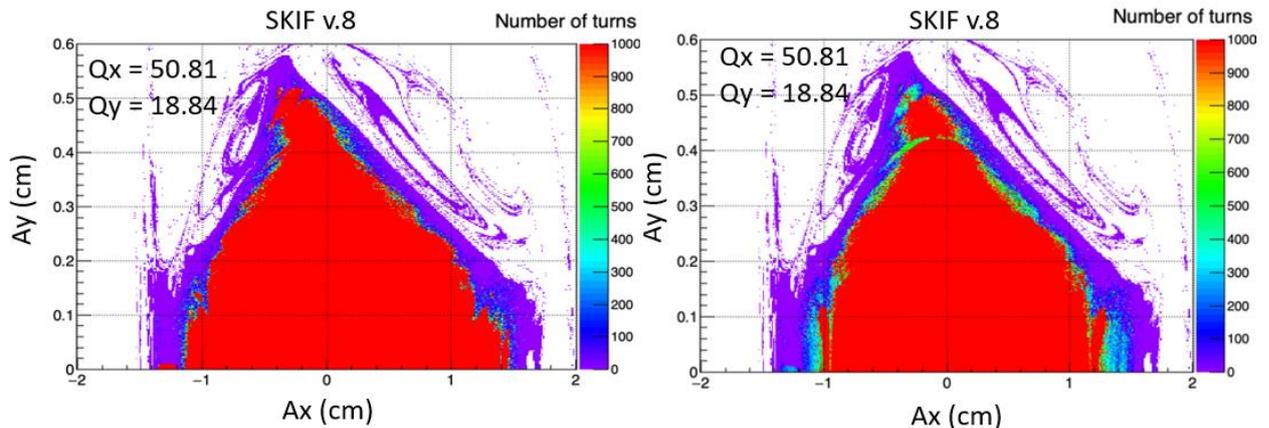
Интересно проследить, как меняется горизонтальный эмиттанс в процессе сканирования; соответствующие результаты приведены на **Рисунке 2.2.3**. Хорошо виден характерный минимум в районе  $\nu_{xc} \approx 3.3$ ; при уменьшении или увеличении горизонтальной фокусировки

эмиттанс растет, однако настроиться на точный минимум не позволяет падение горизонтальной динамической апертуры в области резонанса  $3\nu_{xc} = 10$ . Как и предсказывает теория, от вертикальной бетатронной частоты эммиттанс не зависит.



**Рисунок 2.2.3.** Изменение горизонтального эммиттанса накопителя в зависимости от выбранной рабочей точки частот.

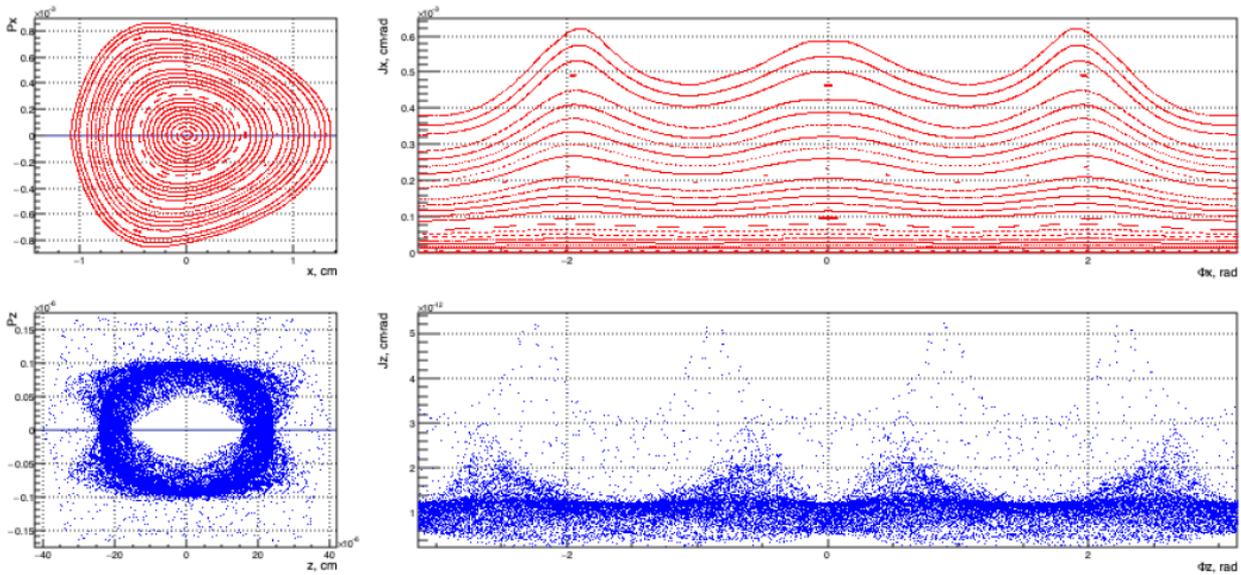
На **Рисунке 2.2.4** показана поперечная динамическая апертура, рассчитанная для всего кольца. Каждая точка означает, что частица с соответствующими начальными условиями  $x_0, y_0, x'_0 = y'_0 = 0$  по результатам моделирования устойчива в течение 1024 оборотов.



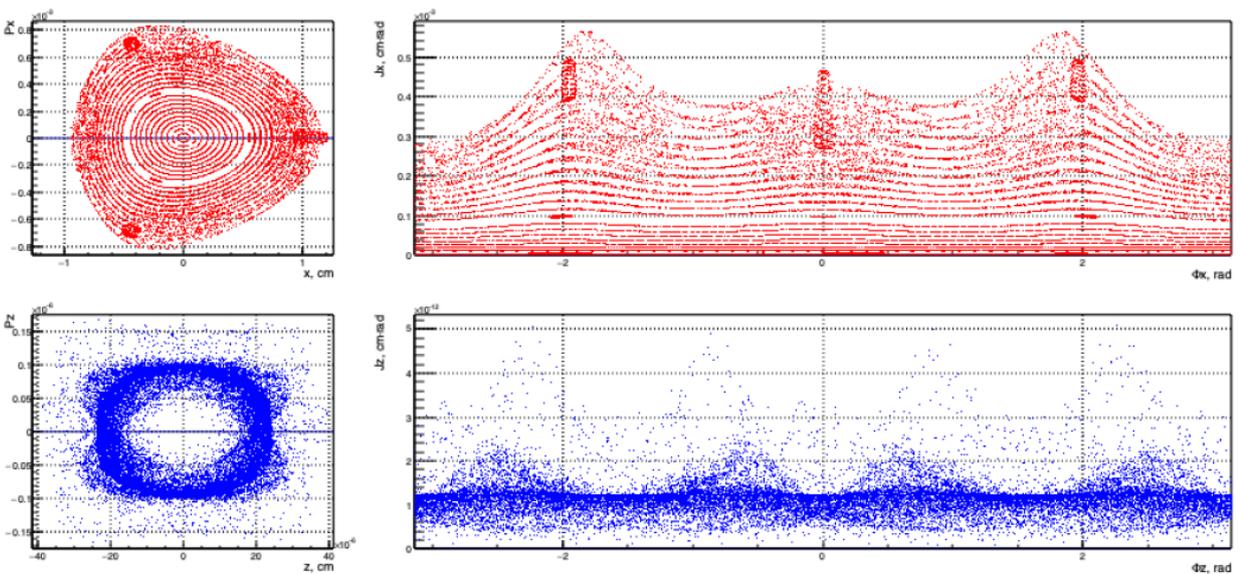
**Рисунок 2.2.4.** Поперечная динамическая апертура в выбранной рабочей точке. Слева без, справа с синхротронными колебаниями. Цвет показывает число оборотов устойчивого движения (Survival plot, Acceleraticum).

Левый **Рисунок 2.2.4** соответствует моделированию с постоянной равновесной энергией (ускоряющие ВЧ резонаторы выключены), правый – с включенными в моделирование резонаторами. Хотя начальный сдвиг по энергии частицы относительно равновесного значения задавался равным нулю, удлинение траектории вследствие бетатронного движения воз-

буждает малые синхротронные колебания, которые слегка (на 1-2 мм) уменьшает максимальную горизонтальную апертуру. Горизонтальные и вертикальные фазовые траектории, соответствующие апертуре **Рисунка 2.2.4** приведены на **Рисунках 2.2.5** и **2.2.6**. На первом из них показано движение частицы с постоянной номинальной энергией. На втором – движение с учетом малых синхротронных колебаний. Отчетливо видно синхробетатронное движение (сателлиты) слабого резонанса третьего порядка при большом горизонтальном отклонении частицы, когда синхротронные колебания перестают быть малыми.



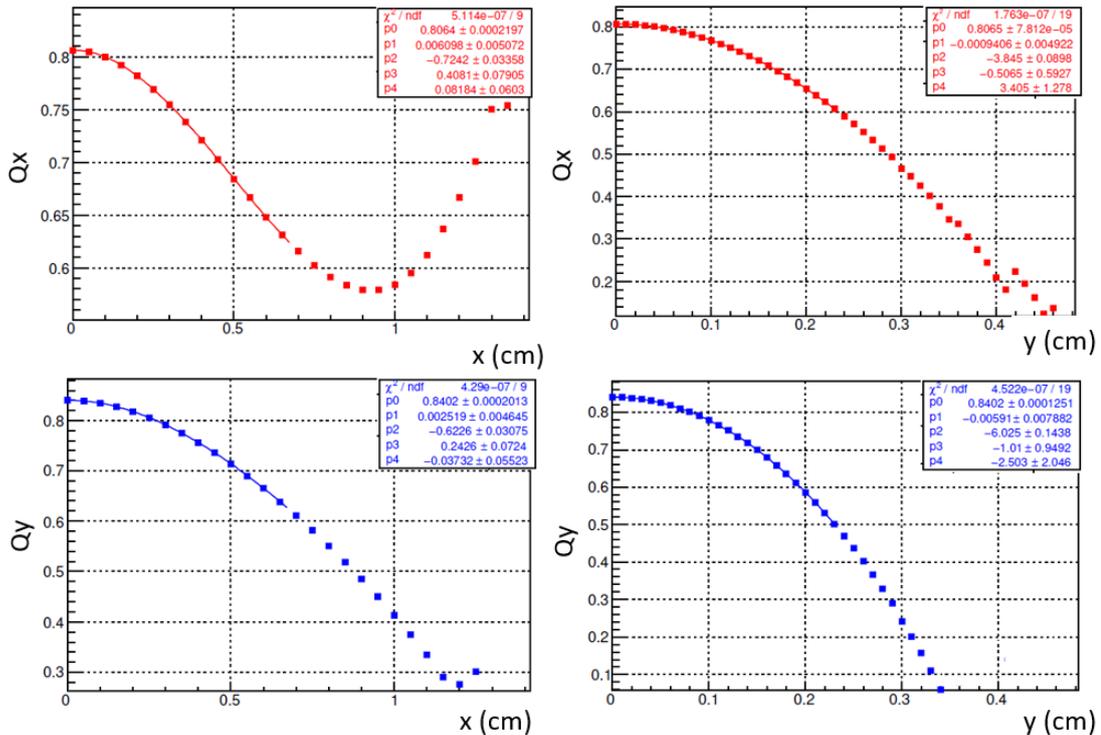
**Рисунок 2.2.5.** Фазовые траектории: горизонтальные (вверху) и вертикальные для частицы с номинальной энергией.



**Рисунок 2.2.6.** Фазовые траектории: горизонтальные (вверху) и вертикальные с учетом малых синхротронных колебаний.

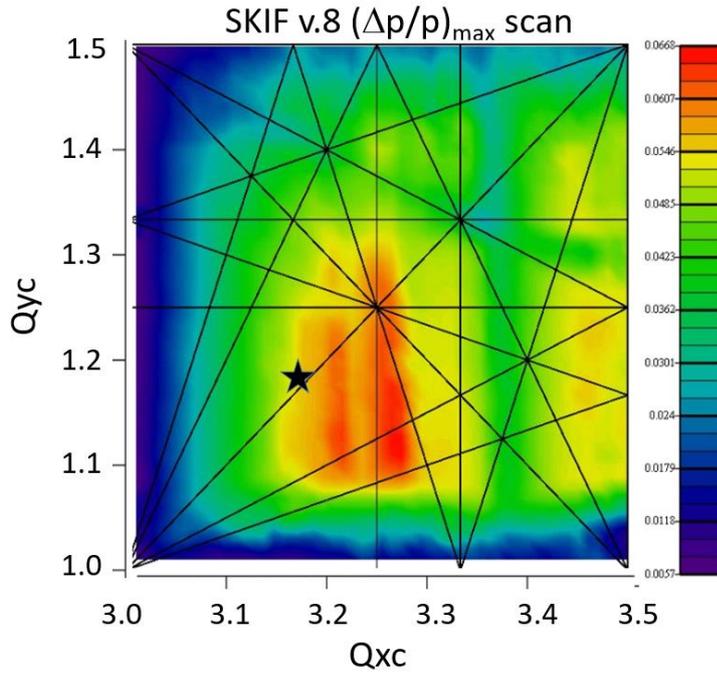
Зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды показана на **Рисунке 2.2.7**.

Для источника синхротронного излучения с малыми размерами сгустка и значительным током имеет место сильное внутривидовое рассеяние, которое приводит к сильному отклонению энергии частицы от расчетной. Чтобы такие частицы не выбывали из пучка (эффект Тушека), уменьшая его время жизни, необходима большая энергетическая (продольная) апертура.



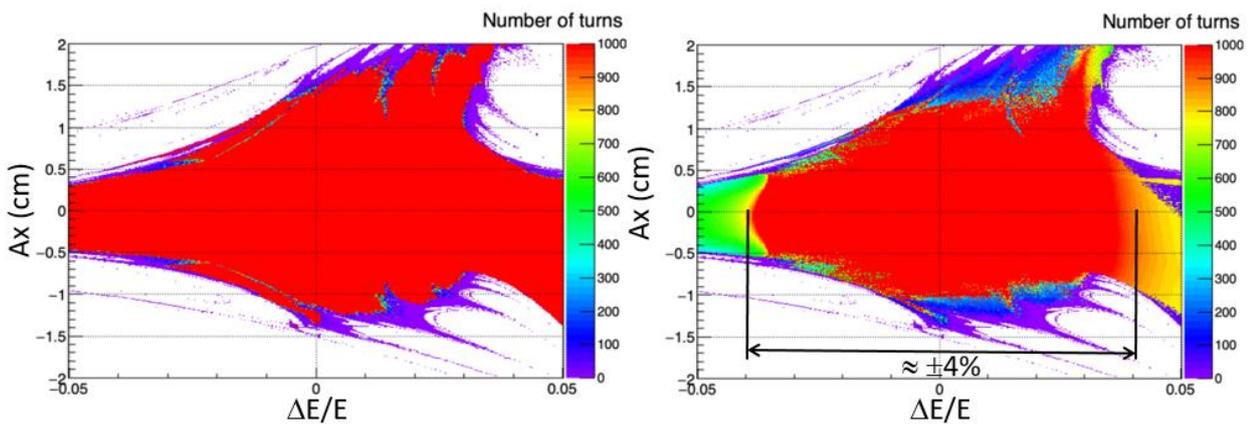
**Рисунок 2.2.7.** Зависимость частоты бетатронных колебаний от амплитуды.

Динамическая (т.е., определяемая поперечной нелинейной динамикой для частицы с отклоненным импульсом) энергетическая апертура накопителя СКИФ в зависимости от бетатронных частот показана на **Рисунке 2.2.8**. Для нахождения энергетической апертуры для частицы с относительным энергетическим отклонением  $\Delta E/E_0 = \text{const}$  находилась поперечная апертура аналогично изображенной на левом **Рисунке 2.2.4**. Значение  $(\Delta E/E_0)_{\text{max}}$ , при котором горизонтальная апертура становится равной нулю и показано цветом на скане **Рисунка 2.2.8**.



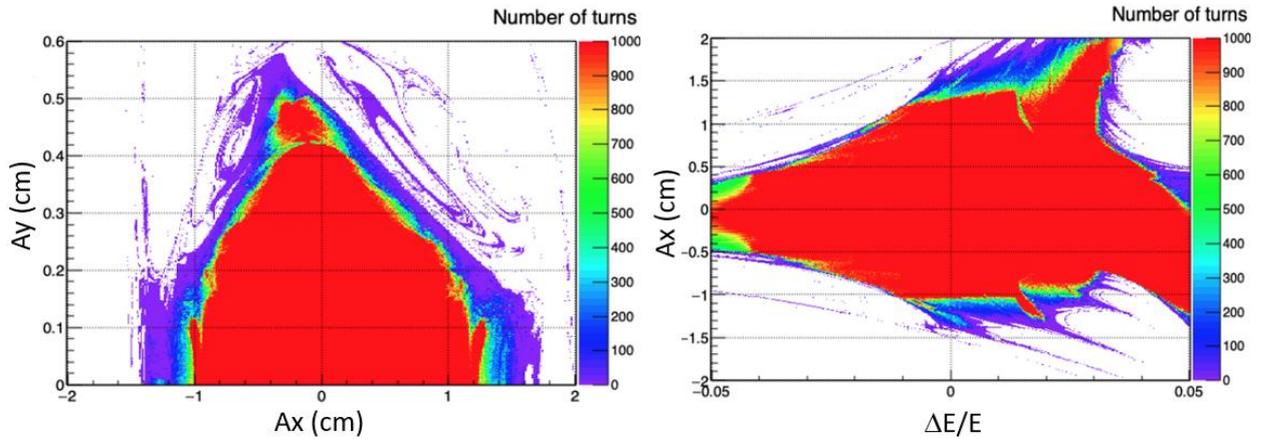
**Рисунок 2.2.8.** Энергетическая динамическая апертура.

Полученный по результатам моделирования размер горизонтальной динамической апертуры как функция относительной погрешности энергии частицы показан на **Рисунке 2.9**. При постоянном отклонении энергии (левый **Рисунок 2.9**) горизонтальная динамическая апертура заведомо больше  $\pm 5\%$ . Однако при учете синхротронных колебаний (правый **Рисунок 2.9**), синхробетатронные резонансы уменьшают энергетическую апертуру до  $(\Delta E/E)_{max} \approx \pm 4\%$ .



**Рисунок 2.2.9.** Горизонтальная динамическая апертура в зависимости от относительного отклонения энергии частицы от расчетного значения. Справа при постоянном отклонении энергии, слева – с синхротронными колебаниями (задаваемое отклонение энергии является начальной амплитудой колебаний).

Если вдобавок учесть синхротронное излучение, включая и радиационное трение, и квантовую раскачку, то поперечная апертура практически не меняется, а энергетическая увеличивается, как это показано на **Рисунке 2.2.10**.



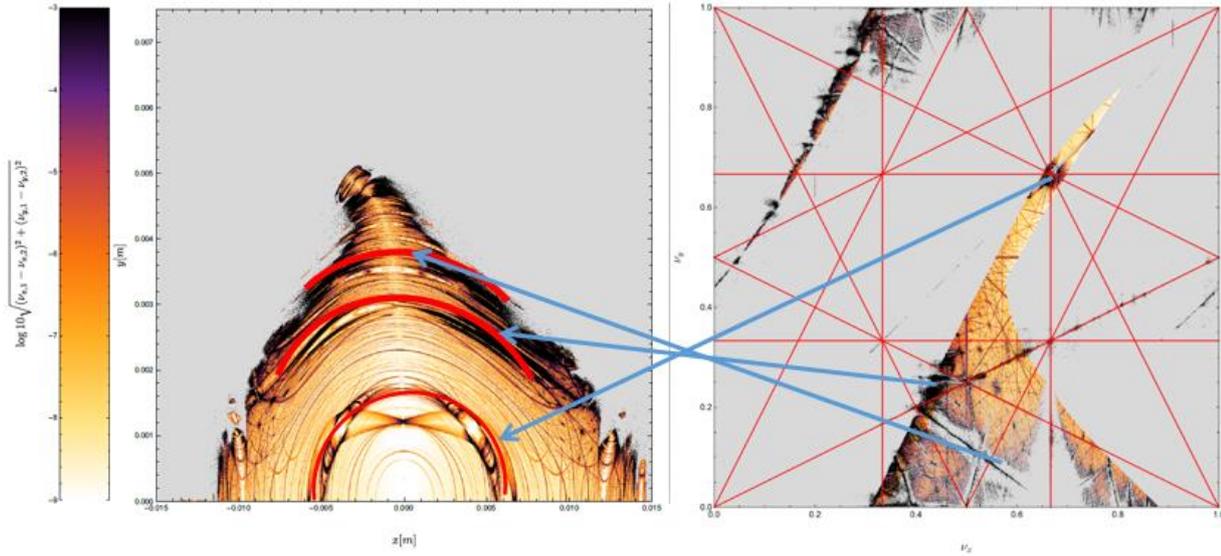
**Рисунок 2.2.10.** Динамическая апертура с учетом радиационных эффектов (затухание и квантовая раскачка).

Показанная поперечная динамическая апертура представляется достаточной как с точки зрения получения требуемого времени жизни, так для обеспечения простой традиционной инжекции пучка в горизонтальной плоскости. Однако всегда имеется вопрос о внутренней структуре динамической апертуры, а именно, нет ли внутри области устойчивости опасных резонансов, которые могут «преподнести сюрпризы» при учете различного рода ошибок магнитного поля. Этот вопрос можно прояснить с помощью техники FMA (Frequency Map Analysis) [15], которая позволяет идентифицировать регулярные и стохастические (вблизи резонансов) траектории. Результаты такого анализа приведены на **Рисунке 2.2.11**.

Стохастические области *не* обязательно являются неустойчивыми, особенно, если они ограничены регулярными траекториями (например, область на **Рисунке 2.2.11**, отмеченная красной дугой с началом и концом в районе  $x_0 \approx \pm 5$  мм), однако они могут помочь более тонко выбрать рабочую точку бетатронных частот. Так, если сдвинуть рабочую точку слегка ниже разностного резонанса связи, чтобы узел резонансов оказался вне футпринта, упомянутая выше область исчезнет из динамической апертуры.

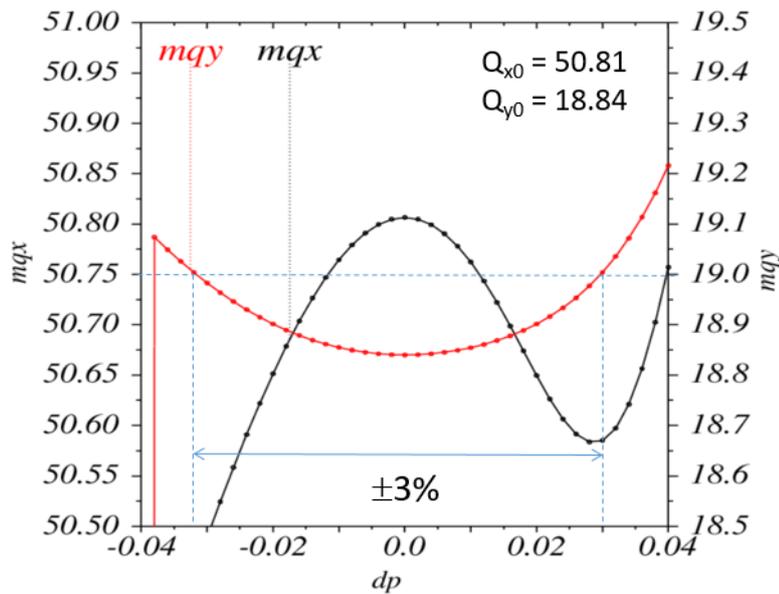
Бетатронная частота зависит не только от амплитуды бетатронных колебаний, но и от энергии (хроматизм частоты). Линейный хроматизм компенсируется секступольными линзами. Однако, нелинейный хроматизм (в который вносят вклад и секступольные линзы) приводит к изменению частоты бетатронных колебаний в зависимости от энергии. Если частоты приближаются к сильному резонансу, движение становится неустойчивым.

Зависимость бетатронных частот от приведенной энергии частицы  $\delta = \Delta E/E_0$  после коррекции линейного хроматизма, показана на **Рисунке 2.2.12**. Ограничением считаем пересечение вертикальной частоты целого резонанса, что дает полосу устойчивости бетатронных частот (betatron bandwidth)  $\delta_{max} \approx \pm 3\%$ .

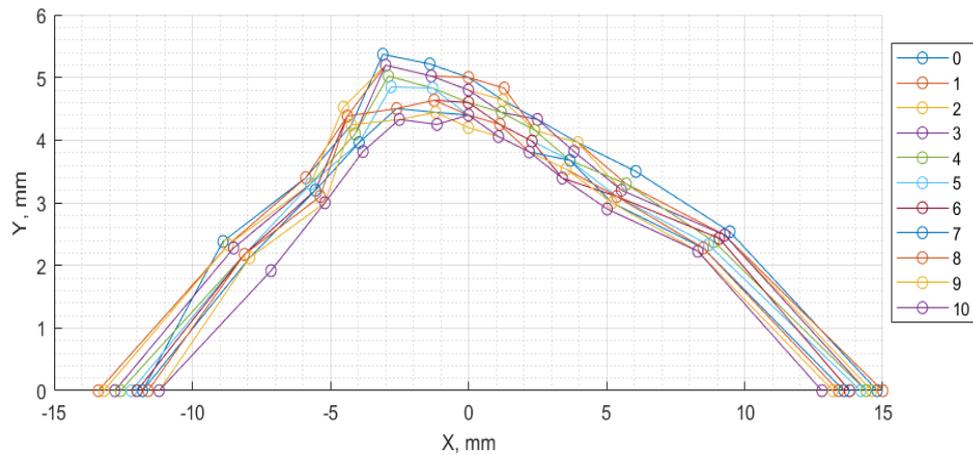


**Рисунок 2.2.11.** FMA для динамической апертуры источника СИ СКИФ. Слева – в пространстве поперечных координат, справа – в пространстве бетатронных частот («футпринт», footprint). Темные и светлые области показывают стохастические и регулярные траектории соответственно.

Для подавления head-tail неустойчивости хроматизм должен устанавливаться положительным. Его значение определяется экспериментально в районе нескольких единиц. На **Рисунке 2.2.13** показана поперечная апертура для случая, когда хроматизм регулируется в диапазоне  $\xi_{x,y} = 0 \div +10$ . Видно, что влияние такой регулировки на размер апертуры не очень существенно.



**Рисунок 2.2.12.** Зависимость бетатронных частот от относительного изменения энергии частицы (betatron tune bandwidth).



**Рисунок 2.2.13.** Динамическая апертура для коррекции хроматизма в диапазоне  $\xi_{x,y} = 0 \div +10$ .

Суммируя, можно указать следующие размеры динамической апертуры источника СИ СКИФ (в центре прямолинейного промежутка при  $\beta_x = 15.6$  м,  $\beta_y = 2.4$  м):

- Горизонтальная апертура с учетом синхротронных колебаний  $A_{xmax} = \pm 12/10$  мм. Инжекция осуществляется снаружи со стороны большего размера.
- Вертикальная апертура  $A_{ymax} = \pm 4$  мм.
- Энергетическая апертура  $\delta_{max} > \pm 5\%$ ; полоса устойчивости бетатронных частот  $\pm 3\%$ .

Таким образом, можно заключить, что описываемая магнитная структура источника СИ СКИФ имеет шестимерную динамическую апертуру (без учета возможных ошибок и неоднородностей магнитного поля) достаточную, как для простой и эффективной инжекции, так и для получения необходимого времени жизни пучка. Еще раз отметим, что это достигнуто всего двумя хроматическими семействами секступольных линз. В принципе, имеется возможность постановки дополнительных мультипольных магнитов (секступолей и октуполей) для дальнейшего улучшения нелинейной области устойчивости, как это делается в других источниках СИ.

### 2.3 Влияние змеек и ондуляторов на динамику пучка

В источнике СИ СКИФ предполагается широкое использование сверхпроводящих «вставных устройств» (insertion devices) – вигглеров и ондуляторов – для увеличения яркости и интенсивности жесткого рентгеновского излучения. ИЯФ является мировым лидером по производству таких устройств [3].

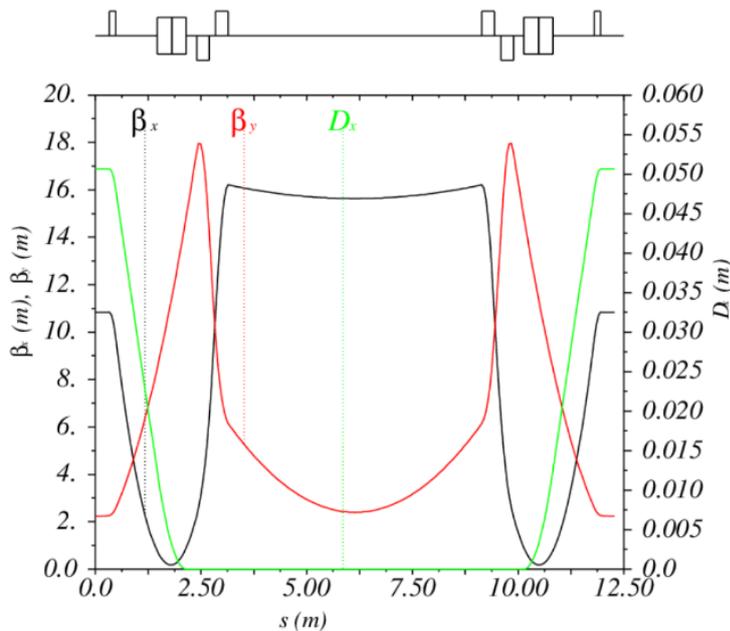
В структуре накопителя СКИФ имеется 16 прямолинейных промежутков длиной 6 м (от среза до среза крайних квадрупольных линз промежутка; срез совпадает с началом/окончанием области поля в кусочно-постоянном приближении). Под установку вставных устройств в структуре «СКИФ» предусмотрены 14 прямолинейных промежутков, один для инжекционного промежутка и один для ускоряющих резонаторов. Нумерация промежутков начинается с единицы, первый - промежуток инжекции, седьмой – под ускоряющие резонаторы.

Базовая версия структуры имеет идентичные промежутки, в центре которых горизонтальная и вертикальная бета-функции равны 15.4 м и 2.4 м соответственно (**Рисунок 2.3.1**). Поскольку в базовой версии по краям промежутка стоят по 2 пары квадрупольных линз, то далее мы называем такой промежуток «дублет-дублетный».

Шесть первых экспериментальных станций используют в качестве источников вставные устройства с параметрами, приведенными в **Таблице 2.3.1**.

Шесть устройств разбиваются на три типа: сверхпроводящий ондулятор SCU, сверхпроводящий вигглер SCW и электромагнитный ондулятор EMU со слабым полем для работы с мягким спектром излучения. Вставные устройства с большими полем и числом периодов (SCW) могут оказывать существенной влияние, как позитивное (уменьшение эмиттанса, увеличение радиационного трения и подавление внутрисгусткового рассеяния), так и негативное (искажение оптических функций, изменение бетатронных частот, уменьшение динамической апертуры и т.д.) на динамику частиц и параметры пучка.

Для косинусного распределения вертикального поля вдоль оси вигглера z (рассматриваем только регулярную часть, вкладом крайних полюсов пренебрегаем).



**Рисунок 2.3.1.** Оптические функции прямолинейного промежутка DD.

**Таблица 2.3.1.** Станции, вигглеры (W) и ондуляторы (U) СКИФ первой очереди.

№	Станция, энергетический диапазон	Устр.	В (Т)	$\lambda_w$ (мм)	$N_{per}$	$P_{SR}$ (кВт)
1-1	«Микрофокус» (5-47 кэВ)	SCU	1.2	15.6	128	7.2
1-2	Структурная диагностика (5-40 кэВ)	SCU	1.2	15.6	128	7.2
1-3	Быстропротекающие процессы (15-100 кэВ)	SCW	4	33.7	60	75
1-4	XAFS и магнитный дихроизм (2.5-35 кэВ)	SCU	1.2	15.6	128	7.2
1-5	Диагностика высокой энергии (25-200 кэВ)	SCW	4	33.7	60	75
1-6	Электронная структура (0.01-2 кэВ)	EMU	0.5	100/200	20/10	1.8

$$B_y(x = y = 0, z) = B_w \cos(k_w z) = B_w \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_w} z\right), \quad (2.3.1)$$

где  $B_w$  и  $\lambda_w$  – амплитуда и период магнитного поля, влияние на оптику кольца удобно оценить с помощью сдвига вертикальной бетатронной частоты (для однородного распределения поля вдоль оси  $x$ , что всегда стараются сделать правильной конструкцией полюсов, горизонтальная частота не меняется):

$$\Delta\nu_y = \frac{1}{8\pi} h_w^2 L_w \overline{\beta_y}, \quad (2.3.2)$$

где  $\overline{\beta_y}$  – средняя по длине вигглера вертикальная бетатронная функция,  $L_w$  – длина вигглера и  $h_w = \rho_w^{-1} = B_w/B\rho$  – кривизна орбиты в максимуме поля  $B_w$ . Наибольшее искажение бетатронной функции из-за дополнительной фокусировки, вносимой вигглером, оценивается по известной формуле

$$\frac{\Delta\beta_y}{\beta_y} \approx \frac{2\pi\Delta\nu_y}{\sin(2\pi\nu_y)}. \quad (2.3.3)$$

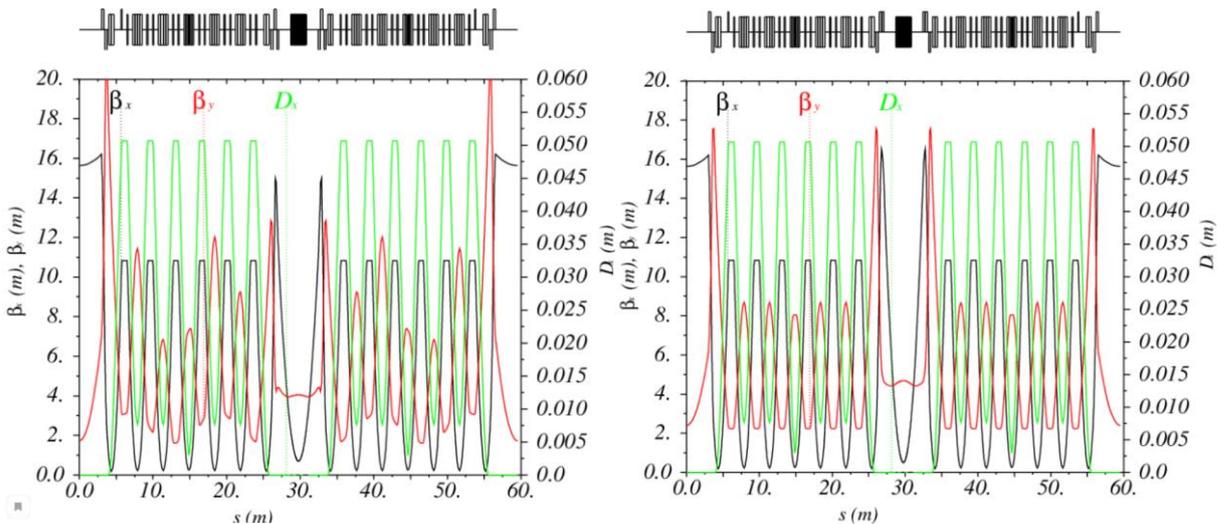
Воспользовавшись (2.3.2) можно оценить сдвиг частоты из-за сверхпроводящих вигглера и ондулятора из **Таблицы 2.3.1**:

$$\text{SCU} \quad \Delta\nu_y \approx 3.4 \cdot 10^{-3},$$

$$\text{SCW} \quad \Delta\nu_y \approx 38 \cdot 10^{-3}.$$

Т.е., возмущение оптики вигглером на порядок больше, чем ондулятором. Для СКИФ компенсация влияния вставного устройства на оптику производится квадрупольными линзами промежутков с независимыми источниками питания. На **Рисунке 2.3.2** показаны оптические функции СКИФ с поставленным вигглером до и после коррекции.

При коррекции основное внимание обращалось на минимизацию биений оптических функций в ячейках периодичности, чтобы избежать возбуждения неструктурных резонансов сильными хроматическими секступольными линзами.



**Рисунок 2.3.2.** Оптические функции с поставленным вигглером SCW до (слева) и после коррекции оптики.

Другой класс эффектов связан с увеличением мощности СИ из-за вигглера. Это приводит к изменению «радиационных» параметров пучка (времена затухания бетатронных и синхротронных колебаний, эмиттанс, энергетический разброс и т.п.), которое удобно описывать с помощью так называемых «радиационных интегралов» [16]. Например, изменение горизонтального эмиттанса пучка из-за действия вигглера можно выразить в виде

$$r_{\varepsilon} = \frac{1+I_{5w}/I_{50}}{1+I_{2w}/I_{20}} \quad (2.3.4)$$

где интегралы  $I_2$  и  $I_5$  отвечают за радиационное трение и квантовую раскачку соответственно, а индексы «0» и «w» относятся к магнитной структуре кольца и вигглера. Для поля (2.3.1) интегралы для вигглера с числом периодов  $N$ , длиной  $L_w = \lambda_w N$  и горизонтальной бетатронной функцией в центре вигглера  $\beta_{xc}$  записываются как

$$I_{2w} = \frac{1}{2} h_w^2 L_w, \quad (2.3.5)$$

$$I_{5w} \approx \frac{8}{15} N \cdot \theta_w h_w^2 \left( \frac{5\eta_{w0}^2}{\beta_x} + \beta_{xc} \theta_w^2 \right).$$

Здесь  $\theta_w = h_w / k_w$  максимальный угол отклонения орбиты от оси змейки, а  $\eta_{w0}$  – дисперсионная функция в прямолинейном промежутке накопителя, куда ставится устройство. Из (2.3.5) видно, для предотвращения роста эмиттанса из-за излучения вигглера нужно чтобы

$$\eta_{w0} \ll \beta_{xc} \theta_w / \sqrt{5}.$$

С этим условием пятый радиационный интеграл вигглера записывается как

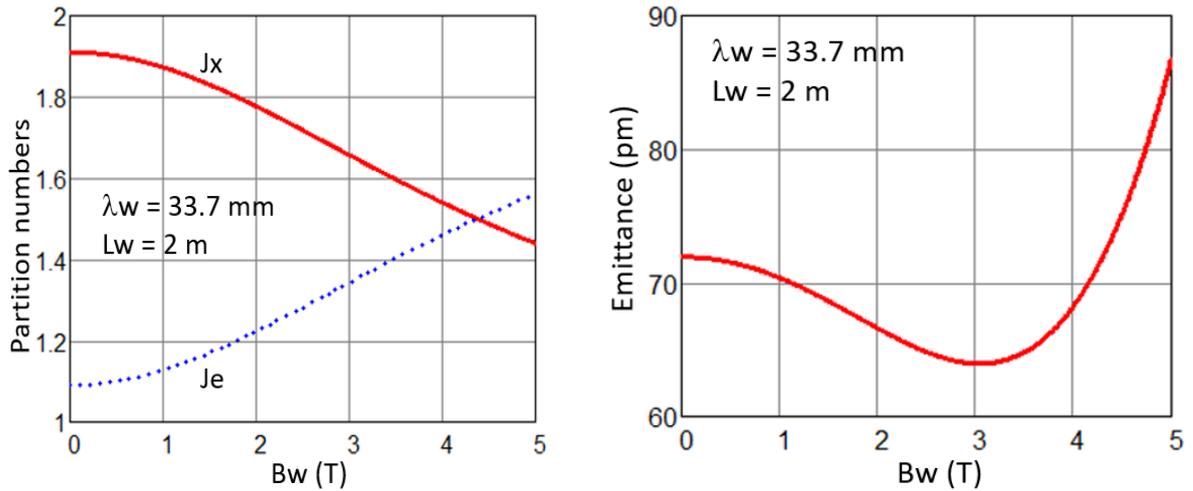
$$I_{5w} \approx \frac{8}{15} N \theta_w^3 h_w^2 \beta_{xc}. \quad (2.3.6)$$

Подставляя  $I_{5w}$  и  $I_{2w}$  в (2.3.4) получаем

$$r_{\varepsilon} \approx \frac{1+8N\theta_w^3 h_w^2 \beta_{xc} / (15I_{50})}{1+h_w^2 L_w / (2I_{20})}, \quad (2.3.7)$$

откуда видно, что при определенных параметрах вигглеры могут как увеличивать, так и уменьшать результирующий эмиттанс источника СИ.

На правом **Рисунке 2.3.3** показано типичное поведение функции  $r_{\varepsilon}$  (2.3.7) в зависимости от амплитуды поля вигглера с параметрами из **Таблицы 2.3.1**. При заданном периоде поля и горизонтальной бета-функции на азимуте вигглера результирующий эмиттанс с увеличением амплитуды поля вначале падает из-за дополнительного затухания, а затем растет из-за увеличения квантовой раскачки. При некоторой амплитуде поля кривая эмиттанса имеет минимум, поэтому правильно подбирая параметры вигглера можно дополнительно уменьшать горизонтальный эмиттанс пучка в источнике СИ (вигглер-затухатель, damping wiggler).

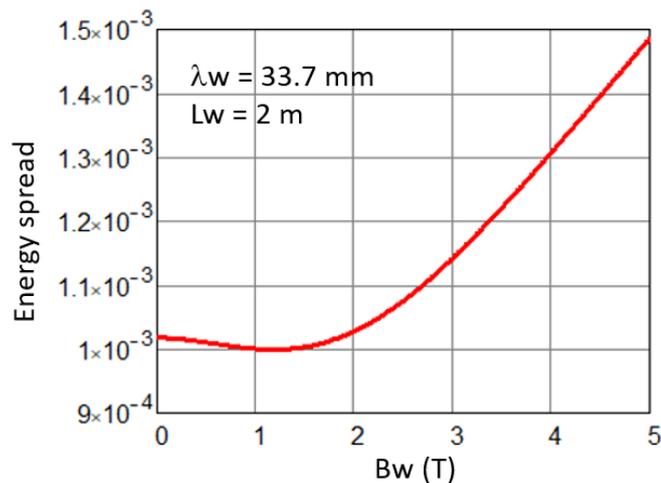


**Рисунок 2.3.3.** Изменение безразмерных декрементов затухания (слева) и результирующего (с учетом изменения горизонтального декремента) горизонтального эмиттанса (справа) в зависимости от амплитуды поля вигглера.

Однако для оценки яркости СИ нужно помнить, что вигглеры модифицируют и остальные радиационные параметры (времена и декременты затухания, энергетический разброс и т.п.). Так, для модели поля (2.3.1) третий интеграл увеличивается на

$$I_{3w} = \frac{4}{3\pi} h_w^3 L_w, \quad (2.3.8)$$

и вызывает неизбежное увеличение энергетического разброса (**Рисунок 2.3.4**).



**Рисунок 2.3.4.** Изменение энергетического разброса пучка в зависимости от амплитуды поля вигглера.

Изменение эмиттанса из-за вигглера зависит от нескольких факторов. Согласно (2.3.5) – (2.3.7) дополнительное излучение меняет радиационные интегралы  $I_2$  и  $I_5$ , причем вклад вигглера в пятый интеграл зависит от величины горизонтальной бета-функции в месте размещения вставного устройства – чем меньше бета, тем меньшего эмиттанса можно достичь. С другой стороны, как следует из левого графика **Рисунка 2.3.3**, горизонтальный безразмерный декремент затухания (который стоит в знаменателе формулы эмиттанса пучка (2.1.2.1)) также

падает с увеличением амплитуды поля вигглера, что приводит к росту эмиттанса. Результирующий эмиттанс и приведен на правом **Рисунке 2.3.3**. Поскольку горизонтальная бета в промежутке вигглера достаточно большая ( $\beta_x = 15.4$  м в центре), уменьшение эмиттанса незначительно, и минимум  $\varepsilon_{xtot} \approx 64$  пм достигается при  $B_w \approx 3$  Т. При максимальной амплитуде поля вигглера из **Таблицы 2.3.1**  $B_w \approx 4$  Т оказывается  $r_\varepsilon \approx 1$ . В этой точке, как видно из (2.3.7), результирующий эмиттанс примерно равен исходному независимо от числа вигглеров, что может рассматриваться как положительный фактор, поскольку на всех станциях условия эксперимента сохраняются.

Результаты численного моделирования влияния вигглеров SCW на параметры пучка приведены в **Таблице 2.3.2** (для примера также показано влияние ондулятора). Вигглер помещался в центр прямолинейного промежутка, оптика корректировалась, как это описано выше. Два вигглера ставились в промежутки напротив друг друга. Три вигглера расставлялись примерно равномерно вдоль кольца (точно это невозможно сделать из-за 16-тикартной симметрии).

**Таблица 2.3.2.** Радиационные параметры пучка с вставными устройствами.

Параметр	Vare	1U	1W	2W	3W
$\varepsilon_{xtot}$ , пм	73	72	74	75	76
$\sigma_E/E \cdot 10^3$	1.03	1.02	1.24	1.32	1.36
$\Delta E/\text{оборот}$ , кэВ	534	548	720	904	1090
$U_{RF}$ , МВ	0.85	0.85	1.1	1.27	1.48
$J_{x/s}$	1.94/1.06	1.91/1.09	1.68/1.32	1.55/1.45	1.46/1.54
$\tau_{x,y,s}$ , мс	9/18/17	9/17/16	8/13/10	7/10/7	6/9/6

Ускоряющее напряжение  $U_{RF}$  (частота ВЧ напряжения  $f_{RF} = 357$  МГц) выбиралось по максимуму «тушековского» времени жизни (см. ниже раздел «Внутрисгустковое рассеяние»), что примерно соответствует энергетическому акцептансу  $(\Delta E/E)_{RFmax} \approx \pm 3\%$ .

И, наконец, рассмотрим влияние вигглера на нелинейную динамику пучка. Даже для однородного поля в горизонтальном направлении (бесконечно широкие полюса) краевое поле полюсов на орбите пучка нелинейно, и (для модели синусоидального поля) может быть описано поправкой к гамильтониану линейного движения вида

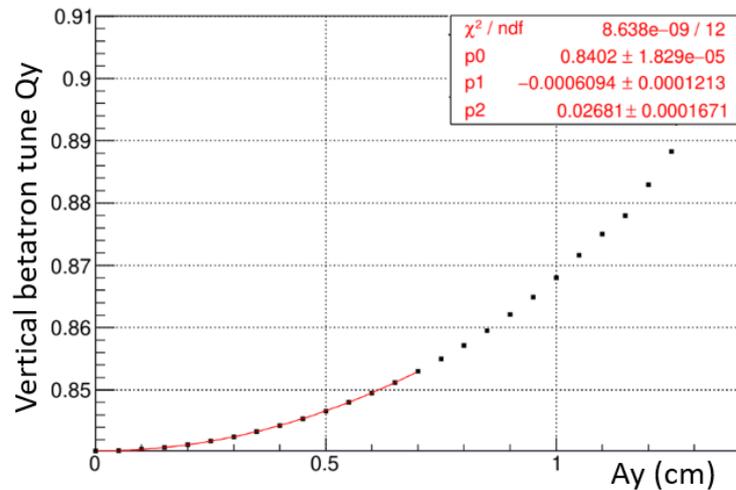
$$\Delta H_2 = \frac{1}{12} \theta_w^2 k_w^4 y^4. \quad (2.3.8)$$

Оценить влияние вигглера на движение частиц можно, например, сравнив нелинейный сдвиг бетатронной частоты из-за поля вигглера

$$\Delta \nu_y(A_y) = C_{yy} A_y^2, \quad C_{yy} \approx \frac{1}{64\pi} L_w k_w^4 \theta_w^2 \beta_{yc} \quad (2.3.9)$$

с тем, который дают сильные секступольные линзы, компенсирующие натуральный хроматизм. Для SCW с параметрами из **Таблицы 2.3.1**  $C_{yy} \approx 280$  м<sup>2</sup>,  $\beta_{yc} \approx 5$  м (см. **Рисунок 2.3.1**) и амплитуды  $A_y = 2$  мм сдвиг частоты  $\Delta \nu_y \approx 1.1 \cdot 10^{-3}$ . Между тем, для этой же амплитуды хроматические секступоли дают величину в двести раз большую:  $\Delta \nu_y \approx 0.24$  (правый нижний **Рисунок 2.2.7**), т.е., можно ожидать, что прямое нелинейное воздействие вигглера (-ров) на

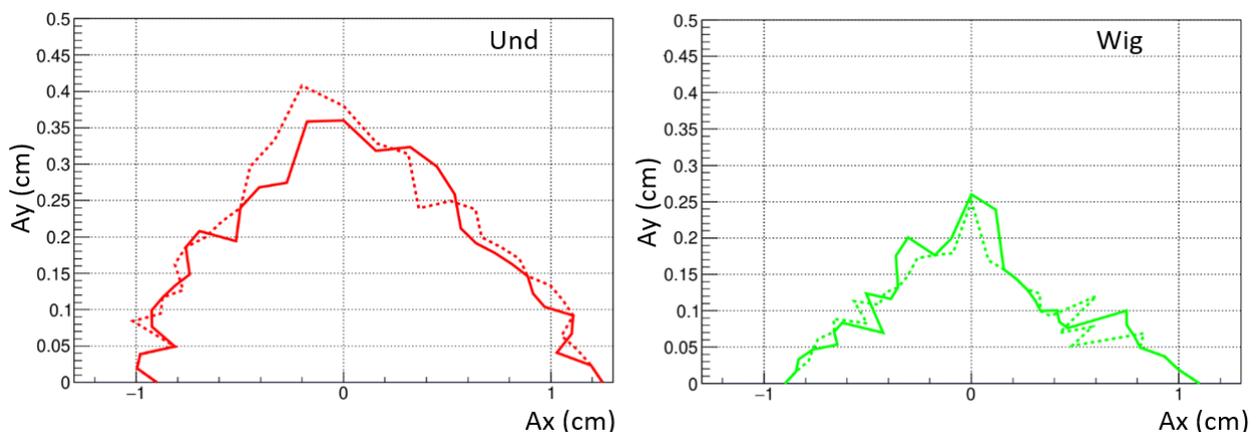
движение частиц будет несущественным. **Рисунок 2.3.5** показывает зависимость вертикальной бетатронной частоты от амплитуды из-за нелинейности вигглера. Этот результат, полученный моделированием, хорошо согласуется с оценкой (2.3.9).



**Рисунок 2.3.5.** Сдвиг вертикальной бетатронной частоты от амплитуды, обусловленный нелинейностью поля вигглера.

Несмотря на хорошее согласование бетатронных функций в ячейках периодичности (их отличие после коррекции оптики  $\Delta\beta_{x,y}/\beta_{0x,y} \approx 10^{-6}$ ), численные расчеты показывают заметную деградацию динамической апертуры для линейной модели поля вигглера или ондулятора (**Рисунок 2.3.6**). Это происходит из-за того, что матрица перехода промежутка со вставным устройством отличается (хотя и несильно) от таковой для пустого промежутка, симметрия кольца «ломается», в окрестности рабочей точки появляется плотная сетка неструктурных резонансов, и апертура падает. В настоящее время продолжают исследования и поиски коррекции этого нежелательного эффекта.

Учет нелинейности поля вставного устройства (пунктирная линия на **Рисунке 2.3.6**), как и оценивалось выше, не оказывает заметного действия.

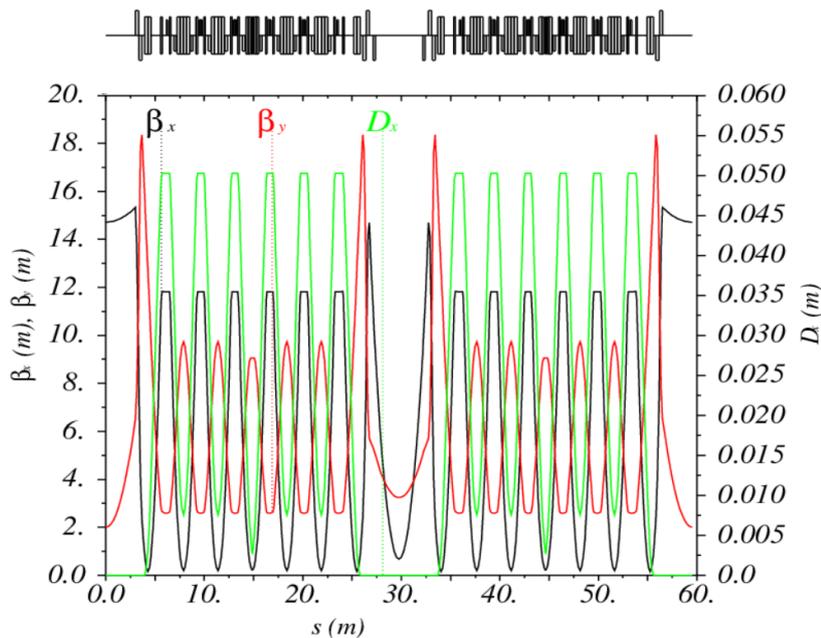


**Рисунок 2.3.6.** Динамическая апертура с учетом поля ондулятора (слева) и вигглера. Сплошная и пунктирные линии соответствуют линейной и нелинейной моделям поля устройства.

### 2.3.1 Опция магнитной структуры с вигглерами и с уменьшенным эмиттансом

Как упоминалось, вигглеры можно использовать для дополнительного понижения эмиттанса пучка. В нашем случае они не уменьшают (но и не увеличивают!) эмиттанс. Интересен вопрос: можно ли так слегка модифицировать структуру, чтобы вигглеры заметно подавляли эмиттанс? Для этого, согласно (2.3.7), нужно уменьшить горизонтальную бета-функцию в промежутке, удерживая вертикальную небольшой, чтобы избежать сильного возмущения оптики. Хорошо, если такое изменение обратимо, т.е., можно вернуться к «базовой» оптике только меняя силы квадрупольных линз, но не их расстановку. С помощью только дублетов линз в прямолинейных промежутках так сделать невозможно – при переходе от одной оптики к другой приходится менять положение линз дублетов в промежутках. Однако заменив дублеты триплетами можно гибко перестраивать оптику промежутка только линзами триплетов, не меняя токи возбуждения остальных магнитных элементов. Длина этого конкретного промежутка уменьшится (до 4.24 м), но все равно в нем можно установить вставное устройство длиной до  $\approx 3.5$  м.

Делать все промежутки с малыми горизонтальной и вертикальной бетами нецелесообразно, поскольку большая горизонтальная бета необходима для инжекции, дополнительная фокусировка ведет к увеличению хроматизма, сил секступольных линз, к падению динамической апертуры и т.д. Учитывая важность симметрии для магнитной структуры (чем реже сетка бетатронных резонансов, тем больше динамическая апертура), мы заменили в структуре источника СИ СКИФ каждый второй промежуток на «триплетный», как это показано на **Рисунке 2.3.1.1**, понизив, тем самым, симметрию минимальным образом. Будем обозначать такую структуру DT (в отличие от базовой, показанной на **Рисунке 2.1.3.3**, «дублет-дублетной» структуры DD). **Рисунок 2.3.1.2** более подробно показывает поведение бета-функций в прямолинейном промежутке.



**Рисунок 2.3.1.1** Опциональная структура СКИФ с чередующимися «дублетными» и «триплетными» промежутками (DT-структура СКИФ).

Структура DT делается из структуры DD путем добавления к существующему дублеты третьей (весьма слабой) квадрупольной линзы (QDT, Таблица 2.3.1.1) и перераспределению градиентов линз триплета. Напомним, что  $K_1 = G/B\rho$ .

Таблица 2.3.1.1. Линзы дублетного и триплетного промежутков.

	$L$ (м)	$K_1$ (м <sup>-2</sup> ) DD	$K_1$ (м <sup>-2</sup> ) DT
QD	0.3	-4.456	-4.901
QF1	0.3	4.397	6.401
QDT	0.25	-	-1.028

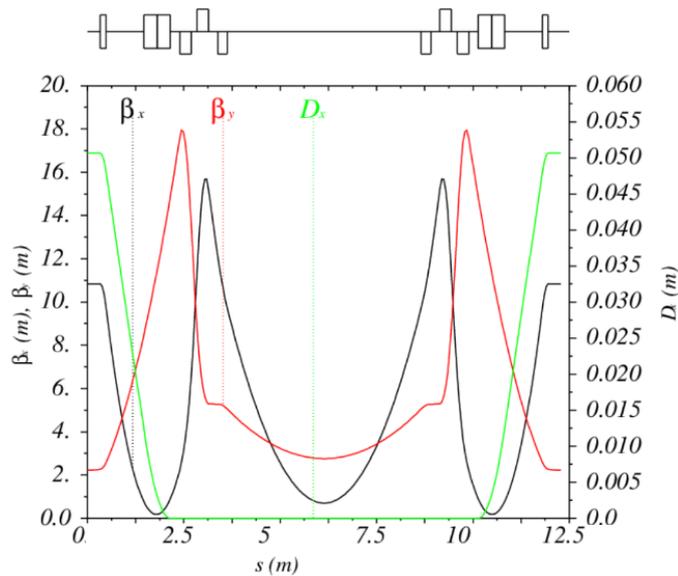


Рисунок 2.3.1.2. Бета-функции в триплетном промежутке.

В Таблице 2.3.1.2 перечислены основные параметры структуры DT, которые, за исключением горизонтального эмиттанса с вигглерами, практически не отличаются от структуры DD. С двумя вигглерами первой очереди удастся уменьшить натуральный эмиттанс (напомним – это горизонтальный эмиттанс при нулевых токе и бетатронной связи) до  $\approx 55$  пм.

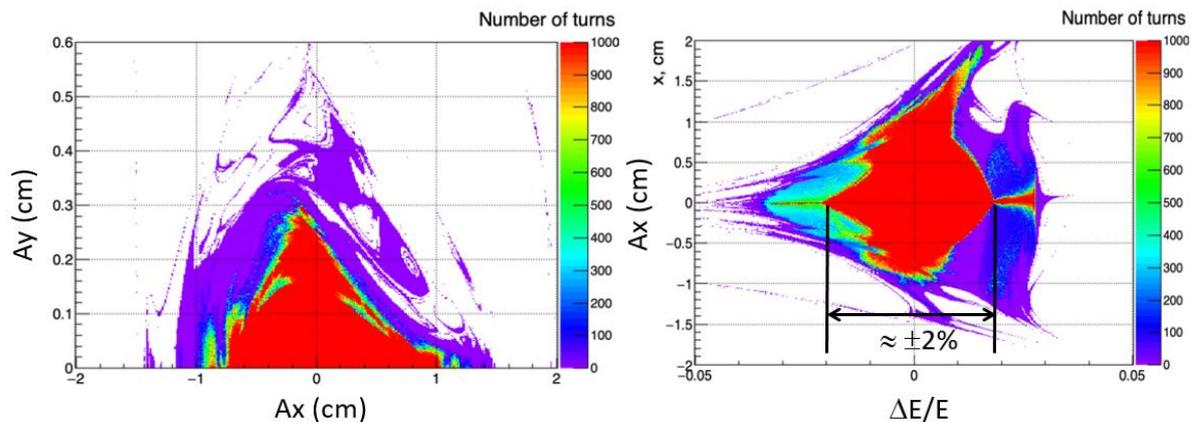


Рисунок 2.3.1.3. Динамическая апертура поперечная (слева) и энергетическая (справа) для структуры DT.

**Таблица 2.3.1.2.** Радиационные параметры структуры DT.

Параметр	Bare	1W	2W	3W
$\epsilon_{\text{tot}}$ , пМ	73	61	54	48
$\sigma_E/E \cdot 10^3$	1.03	1.24	1.32	1.36
$\Delta E/\text{оборот}$ , кэВ	534	720	904	1090
$U_{\text{RF}}$ , МэВ	0.85	1.1	1.27	1.48
$J_{x/s}$	1.94/1.06	1.68/1.32	1.55/1.45	1.46/1.54
$\tau_{x,y,s}$ , мс	9/18/17	8/13/10	7/10/7	6/9/6

Однако, увеличение естественного хроматизма кольца (из-за дополнительной фокусировки) до  $(\xi_x/\xi_y) = -156/-57$  и понижение симметрии с 16 до 8 негативно сказывается на нелинейной динамике (**Рисунок 2.3.1.3**). Особенно это заметно по энергетической динамической апертуре, которая упала с  $(\Delta E/E)_{\text{max}} \approx \pm 4\%$  для DD до  $(\Delta E/E)_{\text{max}} \approx \pm 2\%$  для DT.

Мы планируем продолжить исследование и оптимизацию структуры DT (в частности, по увеличению шестимерной динамической апертуры путем постановки дополнительных мультипольных линз). В принципе, ее можно рассматривать как возможное направление модернизации структуры DD после получения проектных параметров, нескольких лет работы и тщательного изучения этой базовой конфигурации.

В структуре накопителя СКИФ имеется 16 прямолинейных промежутков длиной 6 м (от среза до среза крайних квадрупольных линз промежутка; срез совпадает с началом/окончанием области поля в кусочно-постоянном приближении). Под установку вставных устройств в структуре СКИФ предусмотрены 14 прямолинейных промежутков, один для инжекционного промежутка и один для ускоряющих резонаторов. Нумерация промежутков начинается с единицы, первый - промежуток инжекции, седьмой – под ускоряющие резонаторы.

Базовая версия структуры имеет идентичные друг другу промежутки в центре которых горизонтальная и вертикальная бета-функции равны 15.4 м и 2.4 м соответственно (**Рисунок 2.3.1.4** слева). Поскольку в данном варианте структуры промежутки имеют по 2 пары квадрупольных линз, то удобно называть этот вариант DD (Doublet-Doublet). Кроме этого, был предусмотрен вариант структуры, когда в каждом втором (четные номера промежутков) прямолинейном промежутке, путем добавления дополнительных линз, обе бета-функции будут малы и равны  $\beta_x \approx 0.7$  м и  $\beta_y \approx 4$  м (**Рисунок 2.3.1.4** справа), далее обозначаем DT (Doublet-Triplet). Сравнение сил линз промежутков для обеих версий представлено в **Таблице 2.3.1.3**.

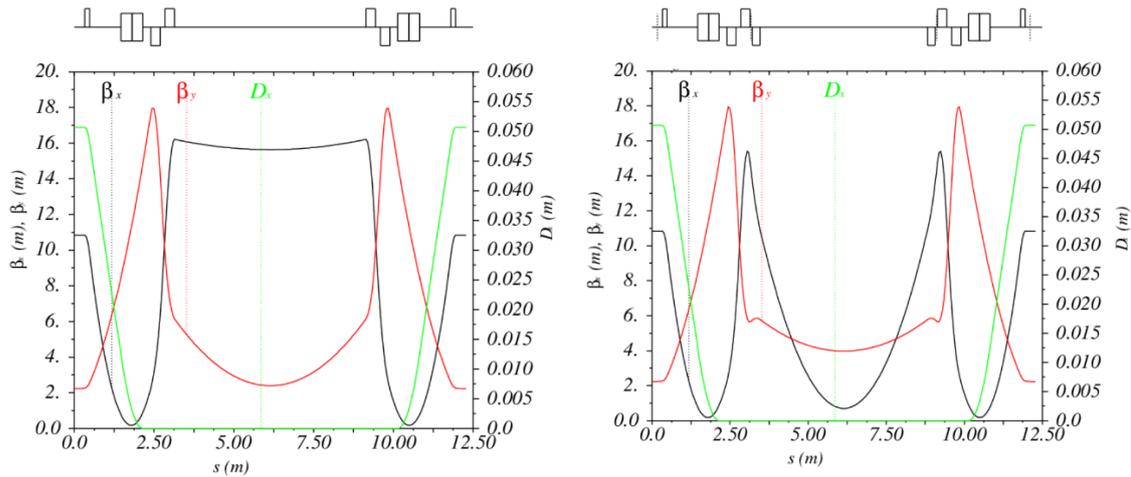


Рисунок 2.3.1.4. Оптические функции прямолинейного промежутка. Слева – DD, справа – DT.

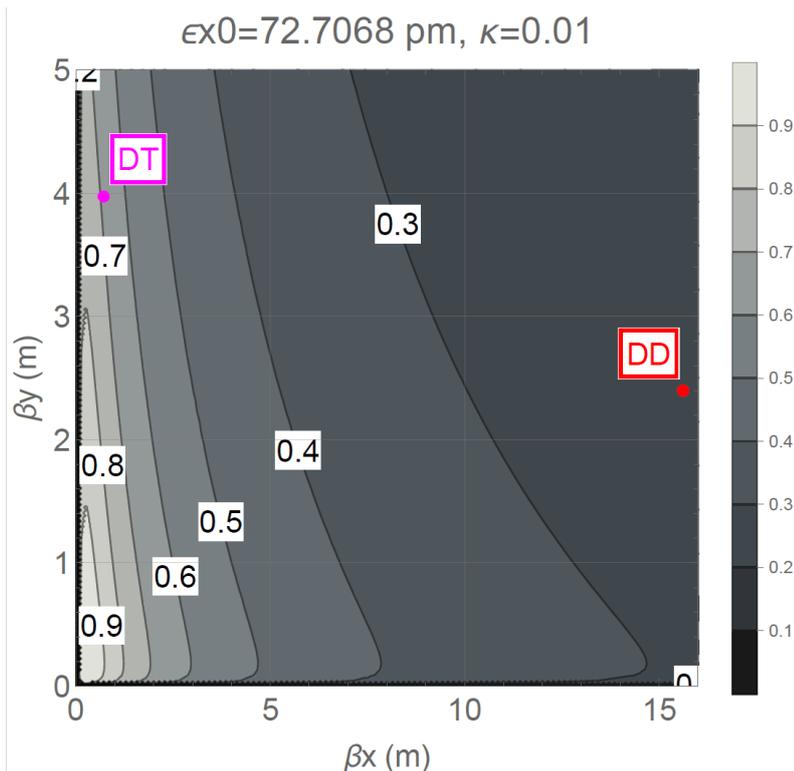
Таблица 2.3.1.3. Сравнение DD и DT без вставных устройств.

	DD	DT
$K1\_Q2, \text{м}^{-2}$	-4.456	-4.905
$K1\_Q3, \text{м}^{-2}$	4.394	6.497
$K1\_Q4, \text{м}^{-2}$	-	-2.842
$\beta_x/\beta_y, \text{м}$	15.4 / 2.4	0.7 / 4
$\varepsilon_x, \text{пм}$	73	
$U_0, \text{МэВ/об}$	0.531	
$\tau_x/\tau_y/\tau_s, \text{мс}$	9.2/17.9/17	
$J_x/J_s$	1.94/1.06	
$V_{RF}, \text{МВ}$	0.845	

Версия структуры DT имеет ряд достоинств: (а) установка ондулятора DT-промежутков позволяет повысить яркость СИ (Рисунок 2.3.1.5) и (б) малая горизонтальная бета-функция позволяет дополнительно уменьшить эмиттанс пучка полем вигглера.

Первая очередь вставных устройств СКИФ включает в себя 6 вставных устройств. Параметры вставных устройств первой очереди приведены в Таблицах 2.3.1.4 и 2.3.1.5.

Далее изучается влияние различных вставных устройств на параметры пучка и, поскольку эффект от «слабого» электромагнитного ондулятора мал, мы будем рассматривать только сверхпроводящие ондуляторы (будем их обозначать ниже SCU) и вигглеры (SCW).



**Рисунок 2.3.1.5.** Нормализованная яркость ( $B/B_{\max}$ ) в зависимости от бета-функций в центре вставного устройства. В более светлой зоне яркость выше.

**Таблица 2.3.1.4.** Ондуляторы.

№ станции	1-1 и 1-2	1-4	1-6
Тип	Сверхпр.	Сверхпр.	Электромаг.
№ промежутка	10 и 13	3	15
Период, мм	15.6	18	212
Амплитуда вертикального поля, Тл	1.25	1.25	0.49
Амплитуда горизонтального поля, Тл	-	-	0.1
Магнитная длина, м	1.997	2.3	4.92
Количество периодов	128	128	20
Межполюсной зазор, мм	7	8	19
Апертура фиксированной маски, мрад	0.2x0.2	0.2x0.2	1.2x1.2

**Таблица 2.3.1.5.** Сверхпроводящие вигглеры.

№ станции	1-3	1-5
№ промежутка	16	8
Период, мм	24	48
Амплитуда вертикального поля, Тл	3.4	4.5
Магнитная длина, м	1.896	0.864
Количество периодов	79	18
Апертура фиксированной маски, мрад	1.8 × 0.11	2 × 0.2

Инсталляция вставных устройств в структуру кольца приводит к искажению оптики и сдвигу бетатронных частот. При достаточно сильном вставном устройстве, биение бета-функций и сдвиг бетатронных частот может приводить к значительному ухудшению динамической апертуры или даже к неустойчивости линейной оптики. Компенсировать сдвиг частоты и искажение линейной оптики, так чтобы это не приводило к ухудшению динамической апертуры и росту эмиттанса, только дублетом линз (для DD) или триплетом линз (для DT) не представляется возможным. Для того, чтобы локально полностью компенсировать влияние любого вставного устройства (в том числе, для будущих экспериментальных станций с неизвестными пока параметрами), необходимо использовать четыре квадрупольных линзы с обеих сторон промежутка, как это показано на **Рисунке 2.3.1.6**.



**Рисунок 2.3.1.6.** Схематическое изображение промежутка со вставным устройством

При этом Q2 и Q3 – это регулярные квадрупольные линзы базовой структуры DD, а Q4 и Q5 могут рассматриваться как корректирующие. Необходимость их постановки решается индивидуально для каждого вставного устройства (например, для «слабого» ондулятора они не нужны совсем). Толщина линз Q4, Q5 – 10 см; под них зарезервировано место в базовой структуре. Расстояние между линзами Q3 и Q4 может варьироваться в пределах от 0.2 м до 0.6 м.

Четыре квадрупольных линзы позволяют получить в центре промежутка как большую горизонтальную бету (аналог DD), так и малую (аналог DT), позволяющую дополнительно уменьшать эмиттанс. Возникает вопрос, насколько хорошо в обоих случаях удастся скорректировать возмущение оптики, и, особенно, насколько уменьшается динамическая апертура в рассматриваемых случаях.

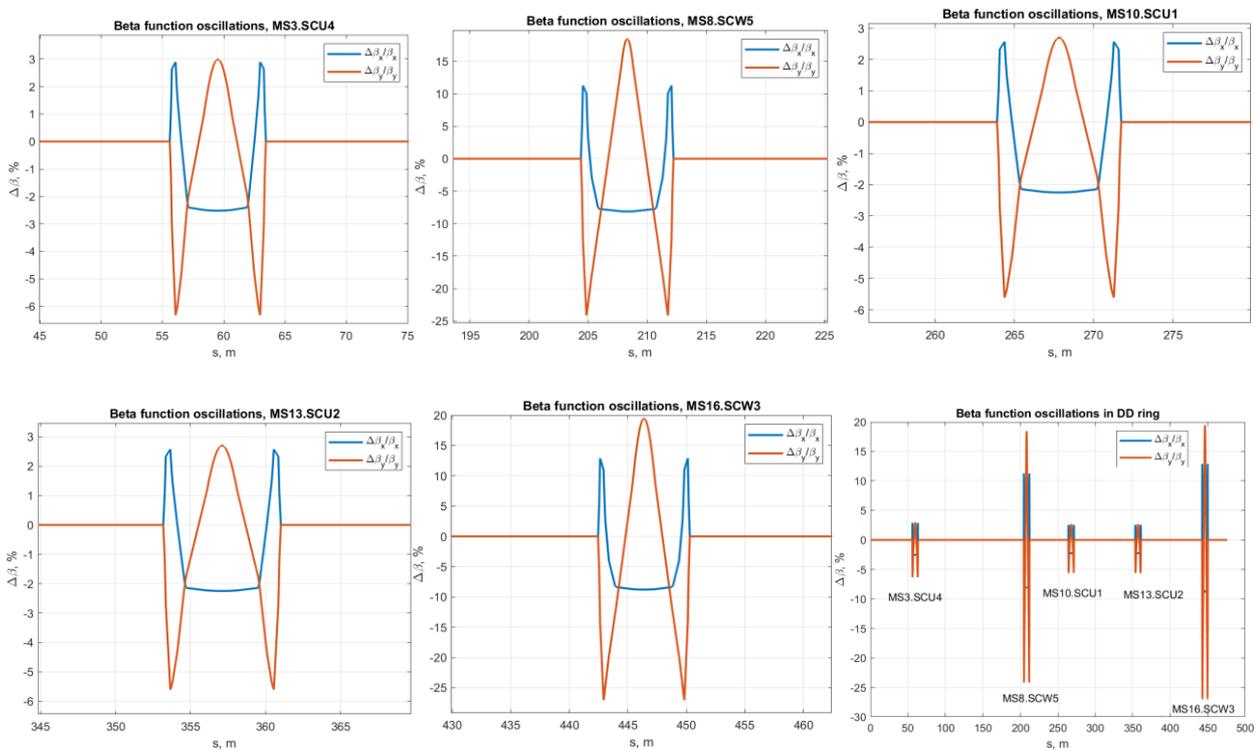
В **Таблице 2.3.1.6** представлены силы линз в промежутках со вставными устройствами, указаны биения бета-функции в промежутках со вставными устройствами. В последней колонке показан режим с пятью вставными устройствами первой очереди (здесь и далее - 5 IDs). Напомним, что шестой – спиральный электромагнитный – ондулятор слабо искажает оптическую структуру и не рассматривается.

Биение бета-функций в варианте, представленном в **Таблице 2.3.1.6**, имеет локальный характер и не выходит за пределы промежутка, как это показано на **Рисунке 2.3.1.7**.

Из **Таблицы 2.3.1.6** следует, что вставные устройства со слабым полем могут слегка уменьшать эмиттанс (напомним, токовые эффекты, например, внутрисгустковое рассеяние, не учитываются), в то время как «сильный» вигглер SCW5 с амплитудой поля 4.5 Т эмиттанс увеличивает.

**Таблица 2.3.1.6.** Параметры структуры DD со вставными устройствами.

	Bare	SCU1/2	SCU4	SCW3	SCW5	5 IDs
$K1\_Q2, м^{-2}$	-4.456	-4.047	-3.991	-1.921	-2.279	-
$K1\_Q3, м^{-2}$	4.394	4.398	4.395	4.021	4.123	-
$K1\_Q4, м^{-2}$	-	-0.201	-0.223	-0.407	-0.454	-
$K1\_Q5, м^{-2}$	-	-1.188	-1.345	-6.382	-5.606	-
$\pm \Delta\beta_{xmax}/\beta_x, \%$	0	-2.25/2.6	-2.5/3	-8.8/13	-8/11	-
$\pm \Delta\beta_{ymax}/\beta_y, \%$	0	-5.6/2.7	-6.3/3	-27/20	-24/18	-
$\epsilon_x, пм$	72.71	71.48	71.3	67.3	85.47	75.89
$U_0, МэВ/об$	0.531	0.549	0.552	0.657	0.635	0.817
$\tau_x/\tau_y/\tau_s, мс$	9.2/17.9/17	9.1/17.3/16	9/17.3/15.8	8.2/14.5/11.7	8.4/15/12.4	7.2/11.7/8.4
$J_x/J_s$	1.94/1.06	1.91/1.09	1.91/1.09	1.76/1.24	1.79/1.21	1.61/1.39
$V_{RF}, МВ$	0.845	0.866	0.869	0.988	0.963	1.167



**Рисунок 2.3.1.7.** Биения бета-функции в местах со вставными устройствами. Бета-функции одинаковы во всех промежутках (аналог DD).

Переход от структуры с большой горизонтальной бетой в промежутке к малой (аналог DT), при четырех линзах в промежутке осуществляется простым перераспределением токов в квадрупольных линзах чётных промежутков. В **Таблице 2.3.1.7** представлены параметры для такой структуры со вставными устройствами.

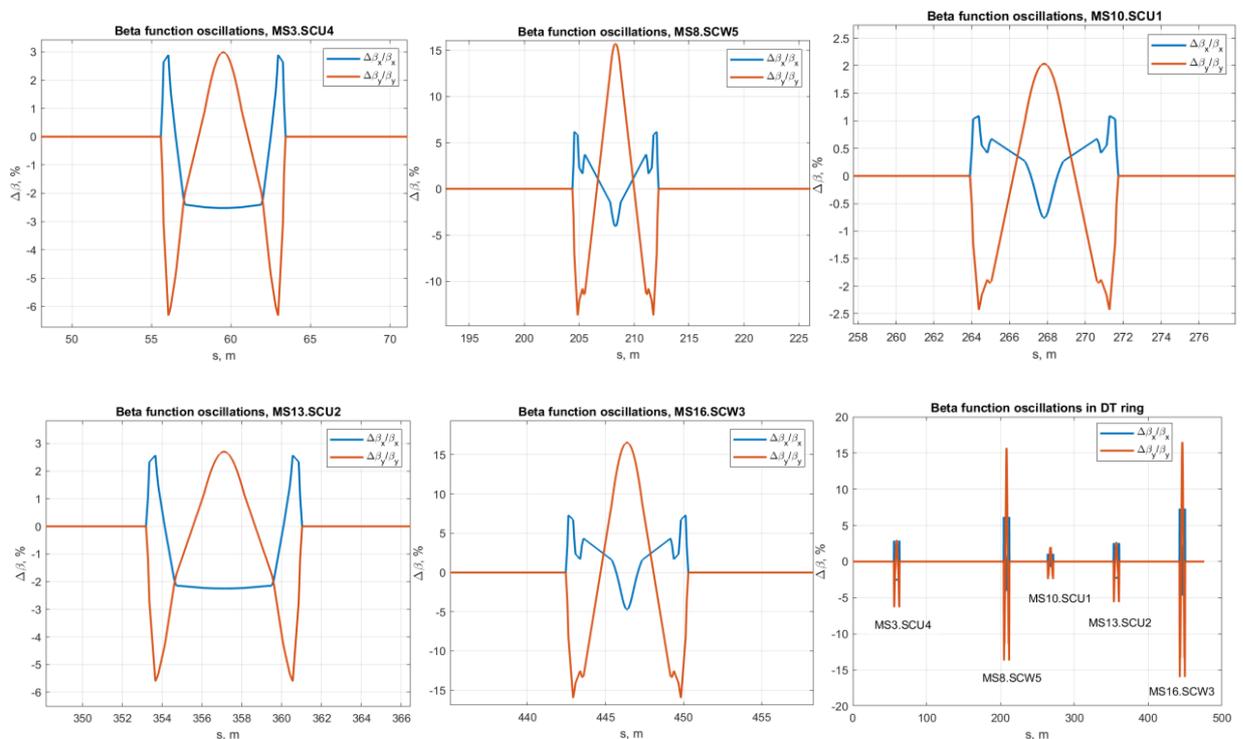
На **Рисунке 2.3.1.8** представлены локальные биения бета-функции в местах со вставными устройствами.

Результатом уменьшения горизонтальной беты в промежутках с сильнополевыми вставными устройствами является, как это следует из **Таблицы 2.3.1.7**, уменьшение горизонтального эмиттанта до 58 пм в случае работы всех пяти сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов первой очереди.

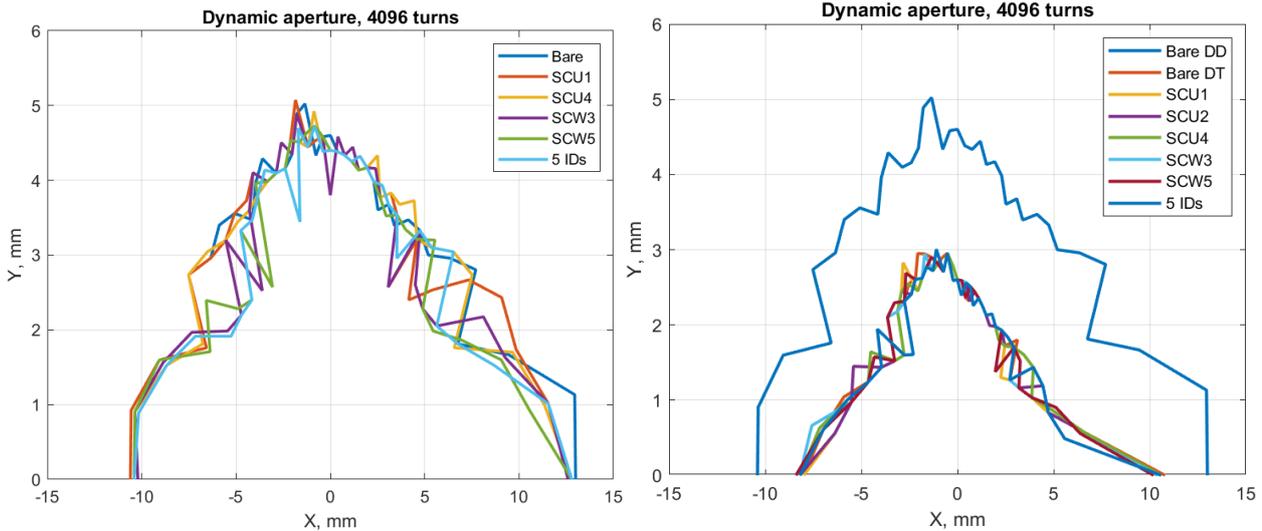
Ниже на **Рисунке 2.3.1.9** показана динамическая апертура для двух режимов, рассмотренных выше. Видно, что во всех случаях горизонтальная апертура достаточна как для получения требуемого времени жизни, так и для эффективной инжекции.

**Таблица 2.3.1.7.** Параметры структуры DT со вставными устройствами.

	SCU1	SCU2	SCU4	SCW3	SCW5	5 IDs
$K1\_Q2, \text{м}^{-2}$	-4.713	-4.047	-3.991	-3.479	-3.713	-
$K1\_Q3, \text{м}^{-2}$	6.436	4.398	4.395	5.958	6.06	-
$K1\_Q4, \text{м}^{-2}$	-2.751	-0.201	-0.223	-1.946	-2.128	-
$K1\_Q5, \text{м}^{-2}$	-0.53	-1.188	-1.345	-3.673	-3.114	-
$\pm \Delta\beta_{xmax}/\beta_x, \%$	-0.8/1.1	-2.25/2.6	-2.5/2.9	-4.7/7.3	-4.1/6.2	-
$\pm \Delta\beta_{ymax}/\beta_y, \%$	-2.4/2	-5.6/2.7	-6.3/3	-16/16.5	-13.7/15.7	-
$\varepsilon_x, \text{пм}$	71.47	71.48	71.3	65	67.14	58.04
$U_0, \text{МэВ/об}$	0.549	0.549	0.552	0.657	0.635	0.817
$\tau_x/\tau_y/\tau_s, \text{мс}$	9.1/17.3/16	9.1/17.4/16	9/17.3/15.8	8.2/14.5/11.7	8.4/15/12.4	7.2/11.7/8.4
$J_x/J_s$	1.91/1.09	1.91/1.09	1.91/1.09	1.76/1.24	1.79/1.21	1.61/1.39
$V_{RF}, \text{МВ}$	0.866	0.866	0.869	0.988	0.963	1.167



**Рисунок 2.3.1.8.** Биения бета-функции в местах со вставными устройствами. Структура с малой горизонтальной бетой в каждом четном промежутке.



**Рисунок 2.3.1.9.** Динамическая апертура в центре прямолинейного промежутка для случаев, представленных в Таблице 2.3.1.6 (слева) и Таблице 2.3.1.7 (справа). Синим цветом на правом рисунке показана невозмущенная апертура для базовой версии DD.

## 2.4 Внутрисгустковое рассеяние

Электроны внутри одного сгустка, совершая бетатронные колебания, испытывают упругие кулоновские соударения, при которых изменение поперечного импульса преобразуется в изменение продольного согласно  $\Delta p_s \sim \gamma \cdot \Delta p_x$ . Для  $\gamma \approx 6000$  это может вызвать потерю обоих электронов за границей устойчивой энергетической области (эффект Тушека). Время жизни пучка по Тушеку быстро падает с уменьшением энергии частиц и объема сгустка  $V_b \propto \sigma_x \sigma_y \sigma_s$ , обратно пропорционально интенсивности пучка  $\tau \propto I_b^{-1}$ , зависит от коэффициента бетатронной связи, как  $\tau \propto \sqrt{k}$ , и требует большого энергетического акцептанса. Последний определяется либо продольной динамикой (размер области устойчивости синхротронных колебаний), либо поперечной, поскольку скачкообразное изменение энергии частицы из-за столкновения возбуждает бетатронные колебания (как из-за излучения кванта) с отклонением, которое может превысить поперечную апертуру.

Если частицы рассеиваются на малый угол, и изменение продольного импульса не приводит к потере частиц, то внутрисгустковое рассеяние (многократный эффект Тушека) ведет к увеличению эмиттанса пучка и энергетического разброса. При фиксированной энергии время нарастания пропорционально объему сгустка и обратно пропорционально интенсивности. Равновесный эмиттанс получается из-за совместного действия двух «нагревающих» механизмов (IBS и квантовой раскачки) и одного «охлаждающего» – радиационной силы трения.

Внутрисгустковое рассеяние (intra-beam scattering, IBS), как правило, определяет и время жизни, и фазовый объем пучка для источников СИ четвертого поколения. Противодействовать этому эффекту можно оптимизируя магнитную структуру, используя вигглеры (увеличивая силу трения излучения), уменьшающие времена затухания бетатронных и синхротронных колебаний, или удлиняя сгусток путем постановки резонатора третьей гармоники,

который деформирует (уплощает) потенциал синхротронного движения. Длинный сгусток мало пригоден для экспериментов с быстрым временным разрешением, что является «платой» за экстремально низкий поперечный эмиттанс.

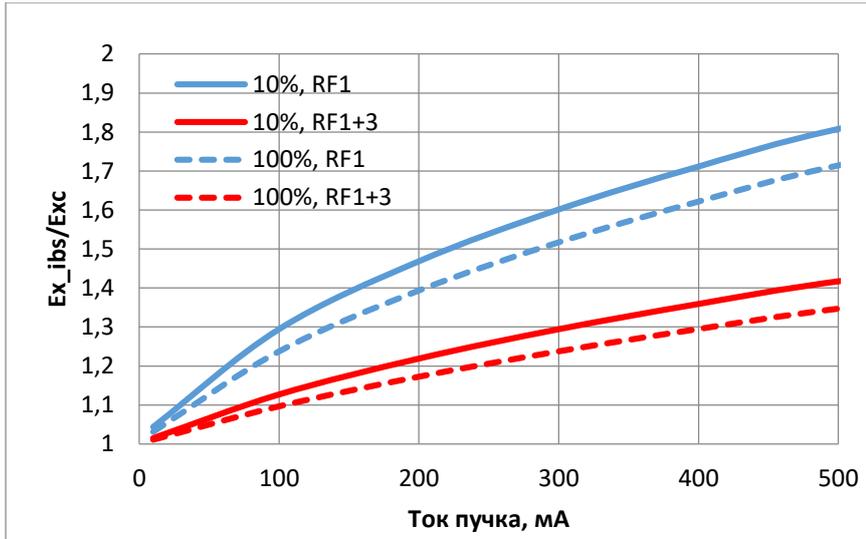
Расчет внутрисгусткового рассеяния для источника СИ СКИФ делался с помощью MAD-X и проверялся еще несколькими программами моделирования ускорителей.

**Таблица 2.4.1** показывает параметры пучка с учетом внутрисгусткового рассеяния; **Рисунок 2.4.1** – графики зависимости прироста эмиттанса в зависимости от тока пучка для базовой структуры без вигглеров и ондуляторов. Расчеты приводятся для бетатронной связи 10% и 100%. Используется либо один ускоряющий резонатор основной гармонике, настроенный, чтобы обеспечить энергетический акцептанс  $(\Delta E/E)_{max} = \pm 3\%$  (ниже этот случай обозначается как RF1), либо имитируется (реальный резонатор в модель не вводится) трехкратное удлинение сгустка (RF1+3). Время жизни пучка «по Тушеку»  $\tau_{TIBS}$  учитывает увеличение объема сгустка из-за многократного внутрисгусткового рассеяния.

В худшем случае при 10%-ной связи и без удлинения сгустка для тока 400 мА тушевское время жизни слегка больше трех часов. Трехкратное удлинение больше чем вдвое увеличивает время жизни. IBS существенно увеличивает эмиттанс пучка. Так, при 10%-ной связи и естественной длине сгустка около 5 мм горизонтальный эмиттанс становится больше 110 пм.

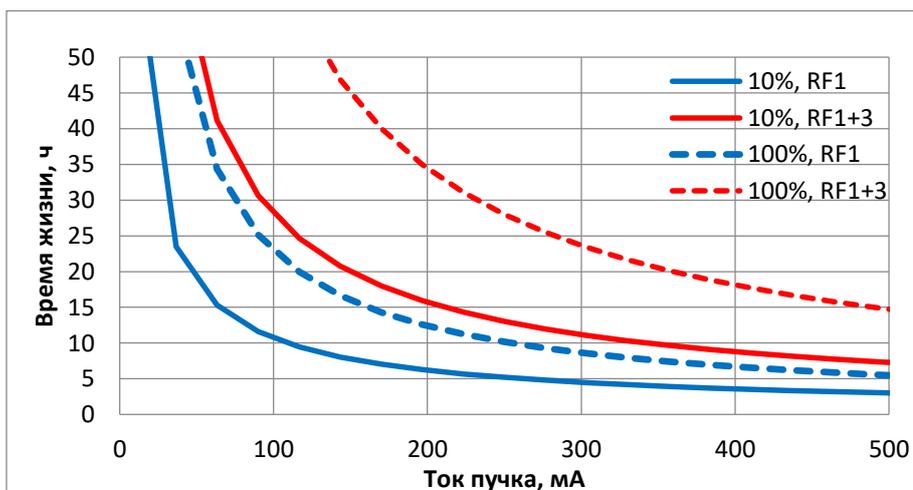
**Таблица 2.4.1.** Параметры пучка при разных параметрах поперечной связи. 500 сгустков, 400 мА, потери/оборот 0.531 МэВ,  $V_{RF} = 0.845$  МВ,  $(\Delta E/E)_{max} = \pm 3\%$ .

	10%		100%	
	RF1	RF1+3	RF1	RF1+3
$\epsilon_{x0}$ , pm	72.7			
$\epsilon_{xcoupled}$ , pm	66		36	
$\epsilon_{xIBS}$ , pm	113	90	59	47
$\epsilon_{yIBS}$ , pm	11	9	59	47
$\sigma_E/E \times 10^4$ (0/IBS)	10.3/12.4	10.3/11.4	10.3/11.4	10.3/10.9
$\sigma_l$ (mm) (0/IBS)	5.3/5.9	15.8/16.2	5.3/5.4	15.8/15.4
$\tau_{TIBS}$ (hours)	3.2	7.9	6.2	17

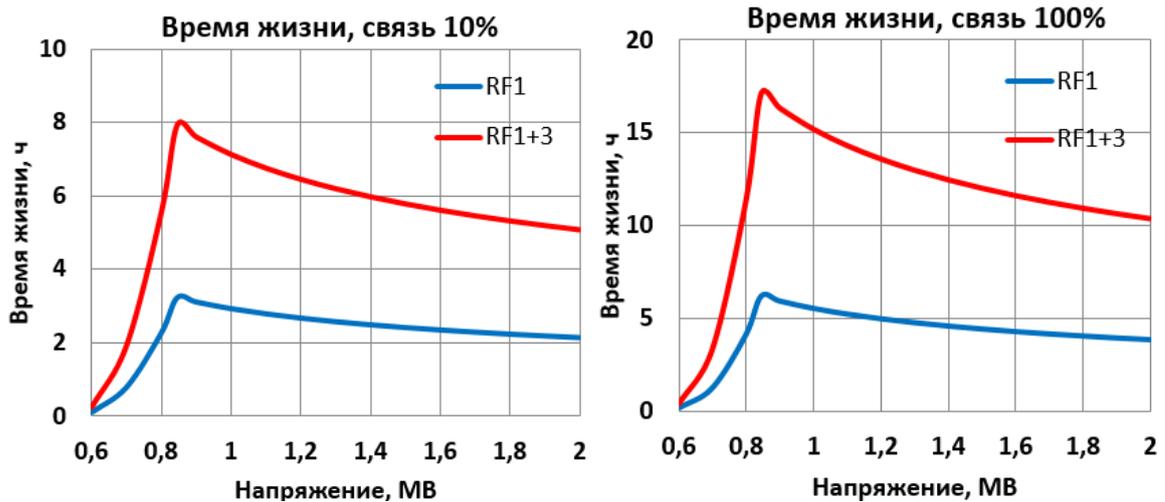


**Рисунок 2.4.1.** Зависимость прироста эмиттанса от полного тока пучка в структуре DD со связью 10% и 100%.

На **Рисунке 2.4.2** показана зависимость времени жизни пучка от полного тока для разных коэффициентов бетатронной связи с трехкратным удлинением сгустка и без него. **Рисунок 2.4.3** демонстрирует зависимость времени жизни пучка от напряжения на ускоряющем резонаторе. При увеличении напряжения размер энергетической сепаратрисы увеличивается, и время жизни быстро растет. Когда сепаратриса сравнивается с искусственно введенным ограничением  $(\Delta E/E)_{max} = \pm 3\%$  (которое, напомним, задается изменением бетатронных частот из-за нелинейного хроматизма), увеличение энергетической области устойчивости прекращается, дальнейший рост напряжения приводит к укорочению сгустка, повышению плотности частиц и к уменьшению тушековского времени жизни. Максимум времени жизни дает нам оптимальное значение напряжения на резонаторе (без учета других эффектов, например, когерентных потерь энергии частицы в вакуумной камере и т.д.).



**Рисунок 2.4.2.** Зависимость времени жизни по Тушеку от полного тока пучка.



**Рисунок 2.4.3.** Зависимость времени жизни по Тушеку от напряжения ВЧ системы в структуре без вставных устройств с учётом внутрисгусткового рассеяния для связи 10% и 100%

Теперь рассмотрим влияние вигглеров и ондуляторов, которые вносят дополнительное радиационное затухание, на параметры внутрисгусткового рассеяния. **Таблица 2.4.2** приводит параметры пучка для различных комбинаций вставных устройств при коэффициенте связи бетатронных колебаний 10% без удлинения пучка и с трехкратным удлинением. Для определенности мы выбрали из **Таблицы 2.3.1** ондулятор SCU и вигглер SCW, обладающие (с точки зрения мощности излучения) экстремальными параметрами. Последние два столбца показывают гипотетическую «максимальную» комплектацию, когда на кольце СКИФ одновременно работают 10 ондуляторов и 2 вигглера.

Последние две строки **Таблицы 2.4.2** показывают величину, которую мы назовем «геометрическая яркость». Яркость – основная пользовательская характеристика синхротронного излучения – представляет собой поток фотонов, нормированный на фазовый размер источника. Яркость зависит от параметров электронного пучка (ток, энергия, эмиттанс и т.д.), от параметров СИ (фотонный эмиттанс) и от параметров излучателя (период, поле, длина и т.д.). Чтобы оценить влияние параметров именно накопителя электронов (с учетом внутрисгусткового рассеяния), из выражения для яркости можно выделить ту часть, которая зависит от этих параметров, отбросив вклад, связанный с характеристиками излучателя (для простоты мы будем говорить только об ондуляторе). Такую «геометрическую яркость» можно определить, как

$$Br(\lambda) = \frac{I}{\Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}} = \frac{I}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_r^2} \sqrt{\sigma_{x'}^2 + \sigma_{r'}^2} \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_r^2} \sqrt{\sigma_{y'}^2 + \sigma_{r'}^2}}, \quad (2.4.1)$$

где  $I$  – полный ток пучка, а остальные обозначения были определены раньше (энергию пучка считаем постоянной).

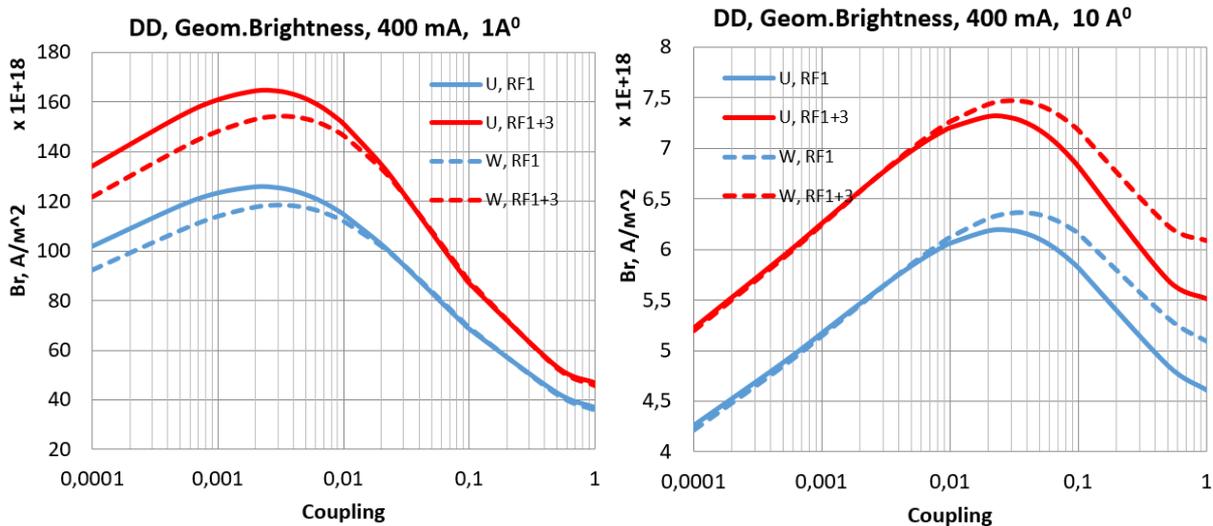
$$\Sigma_{x,y}^2 = \beta_{x,y} \varepsilon_{x,y} + \left( \frac{\sqrt{2\lambda L}}{4\pi} \right)^2, \quad \Sigma_{x'y'}^2 = \frac{\varepsilon_{x,y}(1 + \alpha_{x,y}^2)}{\beta_{x,y}} + \left( \sqrt{\frac{\lambda}{2L}} \right)^2, \quad (2.4.2)$$

где  $L$  – длина ондулятора, а  $\lambda$  – длина волны излучения, для которой рассчитывается геометрическая яркость.

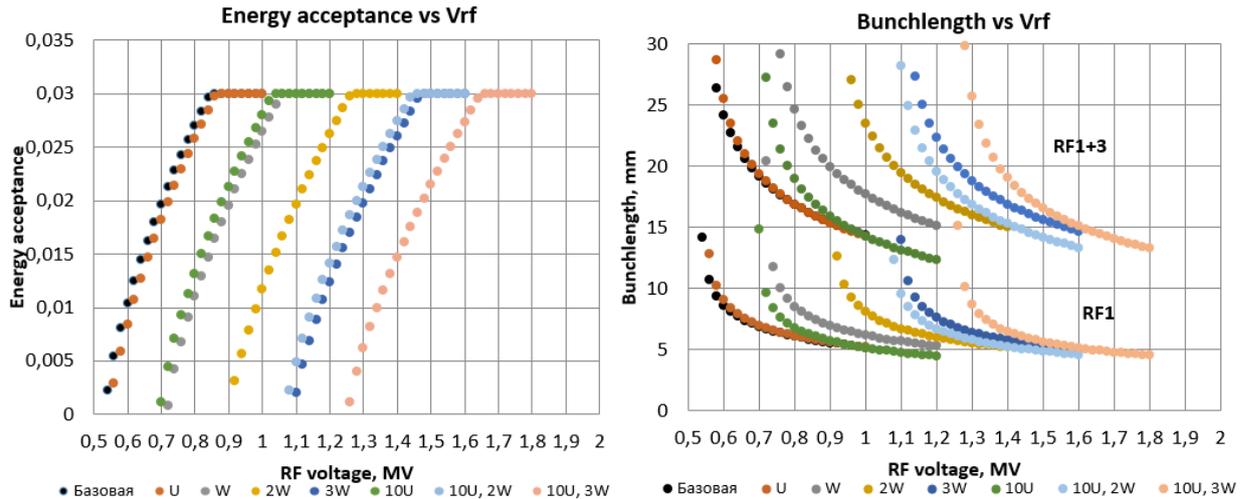
С учетом IBS и в случае, когда электронный и фотонный эмиттансы близки, зависимость геометрической яркости от коэффициента бетатронной связи может оказаться нетривиальной, его изменение может как увеличивать, так и уменьшать интенсивность рассеяния. На **Рисунке 2.4.4** показана зависимость геометрической яркости от коэффициента бетатронной связи для  $\lambda = 1 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 10 \text{ \AA}$ . Из графиков видно, что в первом случае, чтобы получить максимальную яркость коэффициент бетатронной связи должен быть  $\kappa < 1\%$ , а во втором –  $\kappa \approx 5\%$ .

**Таблица 2.4.2:** Сравнение параметров для структуры DD с разной комплектацией вставных устройств. Коэффициент связи  $\kappa = 10\%$ , 510 сгустков, полный ток пучка 400 мА, энергетический акцептанс  $\pm 3\%$ . Бета-функции в центре ондулятора/вигглера  $\beta_x = 15.66/15.78 \text{ м}$ ,  $\beta_y = 2.29/1.76 \text{ м}$ .  $B_{r1}$  и  $B_{r10}$  – геометрическая яркость, рассчитанная по формуле (2.4.1) для  $\lambda = 1 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 10 \text{ \AA}$ .

	SCU		SCW		10SCU+2SCW	
	RF1	RF1+3	RF1	RF1+3	RF1	RF1+3
U, МэВ	0.55		0.72		1.07	
$V_{rf}$ , МВ	0.864		1.06		1.44	
$\epsilon_{x0}   \epsilon_{xcoupled}$ , pm	71.6  65.1		74.1  67.3		67.2 61.1	
$\epsilon_{xIBS}$ , pm	112.8	89.2	106.8	85.7	99.5	78.9
$\sigma_E/E \times 10^4$	10.2		12.4		12.3	
$(\sigma_E/E)_{ibs} \times 10^4$	12.3	11.3	13.5	12.9	13.1	12.7
$\sigma_l$ (mm)	4.8	14.3	5.3	16.1	4.7	14.3
$\sigma_{l\_IBS}$ (mm)	5.8	15.9	5.8	16.8	5.1	14.7
$\tau_{IBS}$ (hours)	3.2	7.7	3.3	8.6	2.7	7.3
$B_{r1}$ ( $A/m^2$ ) $\times 10^{-18}$	58.0	75.6	62.3	80.2	66.8	86.4
$B_{r10}$ ( $A/m^2$ ) $\times 10^{-18}$	5.2	6.2	5.8	6.7	5.7	6.8



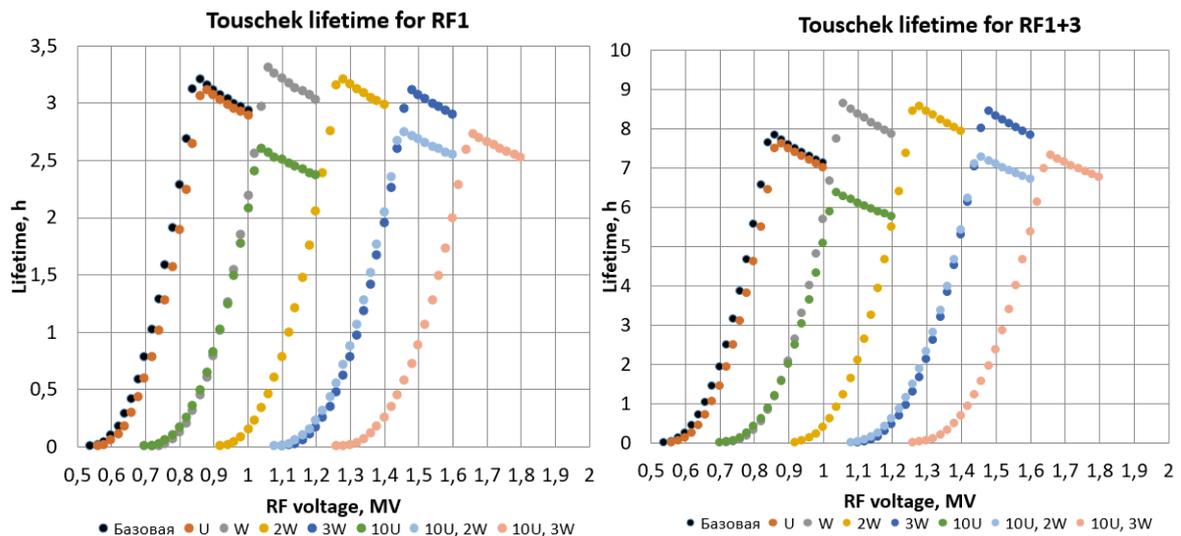
**Рисунок 2.4.4.** Геометрическая яркость в зависимости от коэффициента бетатронной связи для длин волн излучения  $\lambda = 1 \text{ \AA}$  (слева) и  $\lambda = 10 \text{ \AA}$ .



**Рисунок 2.4.5.** Энергетический акцептанс и длина сгустка от напряжения основной ВЧ системы.  $\kappa = 10\%$ .

**Рисунок 2.4.5** (слева) показывает зависимость ширины сепаратрисы синхротронного движения в зависимости от напряжения на ускоряющих резонаторах основной гармоники для различных наборов вставных устройств. Правый **Рисунок 2.4.5** приводит графики зависимости длины сгустка, которая при этом получается.

Тушековское время жизни для естественной и увеличенной длины сгустка в зависимости от напряжения на основных ускоряющих резонаторах приведено на **Рисунке 2.4.6**. Видно, что трехкратное удлинение пучка увеличивает время жизни в  $\approx 2 \div 2.5$  раза.



**Рисунок 2.4.6.** Зависимость времени жизни по Тушеку от напряжения основной ВЧ системы со вставными устройствами с учётом внутрисгусткового рассеяния для связи 10%. Справа – пучок искусственно удлиняется в три раза.

Сформулируем основные выводы из расчетов параметров пучка с учетом внутрисгусткового рассеяния:

- В базовой конфигурации только с основными ускоряющими резонаторами при токе 400 мА в 510 сгустках, коэффициенте бетатронной связи 10% и энергетическом акцептансе  $\pm 3\%$  ( $V_{RF} = 0.845$  МВ) горизонтальный эмиттанс вырастает до 113 пм, а тушековское время жизни составляет 3.2 часа.
- Трехкратное увеличение длины сгустка уменьшает горизонтальный эмиттанс до 90 пм, а время жизни увеличивает до 7.9 часа.
- Введение 100 %-тной связи позволяет получить равные эмиттансы  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 50 \div 60$  пм и еще удваивает тушековское время жизни. При этом, однако, геометрическая яркость сильно уменьшается (см. **Рисунок 2.4.4**).
- В качестве максимальной комплектации (по мощности излучения) вставных устройств определим размещение на кольце 10 сверхпроводящих резонаторов и 2 сверхпроводящих вигглеров с параметрами из **Таблицы 2.3.1**. Согласно **Рисунку 2.4.6** для обеспечения тушековского времени жизни  $\tau_{TWS} \geq 5$  часов необходимо полное напряжение на ускоряющих резонаторах  $V_{RF} = 1.4$  МВ (без учета когерентных потерь и других коллективных эффектов).
- Из **Рисунка 2.4.4** видно, что для обеспечения большой яркости, система коррекции бетатронной связи должна обеспечивать регулировку бетатронной связи в широком диапазоне  $k \approx 0.5 \div 5\%$ .

## 2.5 Коррекция орбиты и бетатронной связи

Жесткофокусирующая магнитная структура, необходимая для уменьшения эмиттанса, сильные квадрупольные и секступольные линзы, малые размеры источника и вытекающие отсюда строгие требования на его стабильность делают источник СИ четвертого поколения крайне чувствительным к отличию магнитного поля на орбите от расчетного. Различные мультипольные компоненты поля, рассматриваемые в качестве погрешностей, оказывают разное влияние на пучок:

- Малые дипольные компоненты поля (горизонтальные или вертикальные) приводят к возмущению замкнутой орбиты пучка.
- Ошибки распределения градиента поля искажают поведение оптических функций, смещают рабочую точку бетатронных частот, изменяют эмиттанс и т.д.
- Skew-градиентные поля вводят нежелательную связь бетатронных колебаний, изменяют размеры источника излучения.
- Мультипольные ошибки высокого порядка изменяют хроматичность кольца (секступольная компонента), уменьшают динамическую апертуру и энергетический акцептанс.

Источниками нежелательных погрешностей магнитного поля являются неточность изготовления и геодезической выставки магнитов, различие магнитных свойств материала ярма и полюсов, отличие тока возбуждения от номинального и др. Зачастую один источник может приводить к целой совокупности нежелательных эффектов. Так, ошибка поперечного положения секступольной линзы вызывает и искажение замкнутой орбиты, и нарушение поведения оптических функций, и появление дополнительной бетатронной связи.

Некоторые ошибки поля необходимо рассматривать не только статически, но и динамически, с учетом их зависимости от времени. Быстрые поперечные колебания положения магнитов относительно оси пучка, природного характера (сейсмика) или техногенные

(насосы, компрессоры, перемещение грузов и т.д.), приводят к смещению положения источника излучения (по координате и углу) и, как следствие, к эффективному увеличению эмиттанса источника. К таким же явлениям могут приводить и пульсации тока питания магнитов.

### 2.5.1 Ошибки выставки

Магнитные элементы на кольце неизбежно имеют смещение относительно проектного положения. Точность выставки элементов определяется их конструкцией, погрешностями изготовления, техническими возможностями системы позиционирования и т.д. Моделирование движения частиц в накопителе СКИФ с учетом неточностей выставки, а также, изучение и использование опыта современных источников СИ приводит к требованиям на точность выставки магнитных элементов СКИФ, приведенных в **Таблице 2.5.1.1**. Предполагается стандартная на сегодня схема размещения нескольких магнитных элементов на длинных (4÷5 м) прецизионных подставках («гирдерах», англ. – *girder*), поскольку коррелированное перемещение разнополярных фокусирующих магнитов существенно уменьшает искажение замкнутой орбиты.

**Таблица 2.5.1.1.** Требования на выставку магнитных элементов основного кольца.

	$\sigma_x, \mu\text{м}$	$\sigma_y, \mu\text{м}$	$\sigma_s, \mu\text{м}$	$\sigma_\psi, \mu\text{рад}$
Гирдеры	80	80	150	200
Элементы на гирдере	30	30	150	200

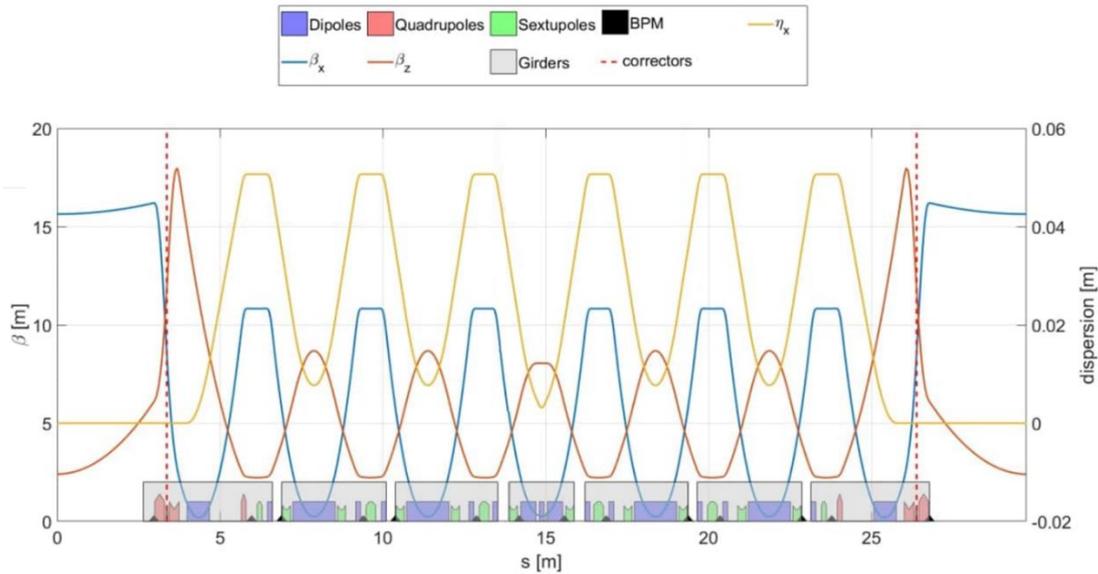
Значения в таблице даны в смысле среднеквадратичного отклонения от проектного положения. В последнем столбце таблицы приводятся допуски на поворот магнитов вокруг продольной оси (оси пучка).

### 2.5.2 Коррекция замкнутой орбиты пучка

Для измерения замкнутой орбиты в СКИФ имеется набор мониторов (датчиков) положения пучка (англ. – *Beam Position Monitor*, BPM) в количестве 14 BPM × 16 суперпериодов = 224 BPM. Размещение датчиков положения пучка в одном суперпериоде показано на **Рисунке 2.5.2.1**.

Для коррекции замкнутой орбиты предусмотрены дипольные корректоры, большая часть которых реализована в виде дополнительных обмоток питания на полюсах секступольных линз.

Каждая из 256-ти секступольных линз несет, кроме основных сильных секступольных катушек, дополнительные, относительно слабые катушки коррекции включая дипольную (вертикальную и горизонтальную), создающую поле до 100 Гс и градиентную (нормальную и skew-) с максимальным значением градиента до 100 Гс/см. В дополнение к коррекциям в секступольных линзах, в каждом суперпериоде магнитной структуры накопителя размещены два отдельно стоящих дипольных корректирующих магнита. Они находятся между квадрупольными линзами прямолинейных промежутков и отмечены на **Рисунке 2.5.2.1** пунктирной линией. Каждый из этих корректоров при магнитной длине в 5 см может создавать вертикальное и горизонтальное дипольное магнитное поле с индукцией до 400 Гс, а также skew-квадруполь с силой до 200 Гс/см.



**Рисунок 2.5.2.1.** Суперпериод СКИФ с обозначенными элементами. Серым цветом внизу графика показано разбиение магнитных элементов суперпериода по семи гирдерам.

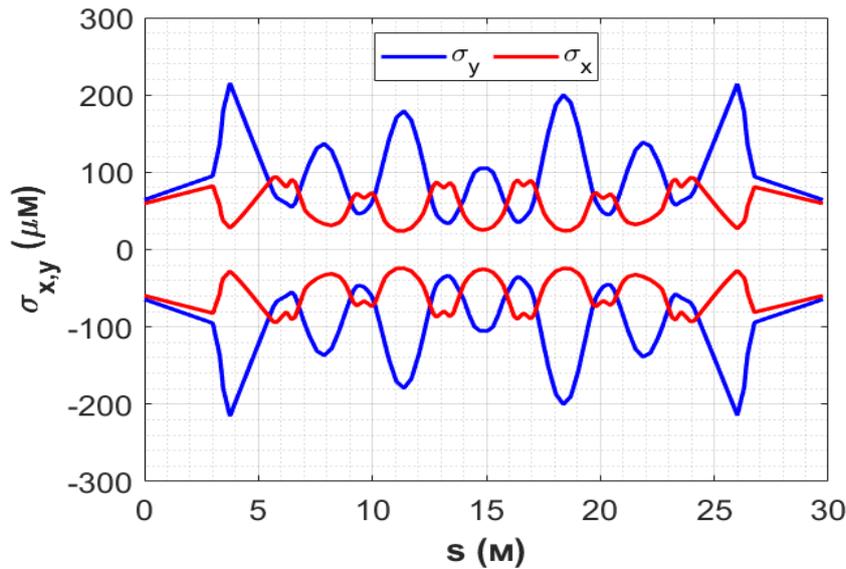
Таким образом, в накопительном кольце есть 320 дипольных корректора по горизонтали и столько же по вертикали, 288 skew-квадрупольных и 256 квадратупольных корректоров.

Для моделирования искажения и коррекции замкнутой орбиты в накопителе ошибки выставки магнитных элементов из **Таблицы 2.5.1.1** задавались в структуру кольца случайным образом согласно распределению Гаусса (24 выборки), ограниченному на уровне  $\pm 2\sigma$  во избежание нереально больших искажений.

Исправление искаженной замкнутой орбиты производилось в три этапа. Вначале, корректировалась собственно орбита при помощи программы MAD-X (использовались различные алгоритмы – MICADO, SVD, LSQ). Затем исправлялось отклонение оптических функции от расчетных с помощью градиентных корректирующих обмоток, и, наконец, skew-квадрупольными корректирующими катушками компенсировалась линейная связь бетатронных колебаний.

На **Рисунке 2.5.2.2** приведен график огибающей (на уровне одного стандартного отклонения) положения орбиты после коррекции вдоль суперпериода по 24 выборкам, усредненным по 16 суперпериодам.

В **Таблице 2.5.2.1** приводятся амплитудные значения полей корректоров, которые понадобились для удовлетворительной коррекции орбиты, оптики и бетатронной связи. Эти значения приблизительно в 2 раза меньше проектных, приведенных выше, и, следовательно, система коррекции обладает необходимым запасом по силам корректоров.



**Рисунок 2.5.2.2.** Огибающая положения орбиты вдоль суперпериода по 24 выборкам после коррекции (одно стандартное отклонение).

В **Таблице 2.5.2.2** даны основные параметры оптической системы накопителя СКИФ после искажения замкнутой орбиты, вызванной погрешностями позиционирования магнитных элементов, и последующей коррекции орбиты и оптики. Остаточная среднеквадратичная погрешность орбиты по показаниям датчиков положения пучка не превышает 100 мкм, что приводит к «биению» бетатронных функций на уровне 1% и значению горизонтального эмиттанса  $74 \pm 2$  пм. Связь бетатронных колебаний удается скомпенсировать до значения (отношение вертикального эмиттанса к горизонтальному)  $10^{-3}$ . Методика коррекции линейной бетатронной связи поперечных колебаний пучка описана в следующем параграфе.

**Таблица 2.5.2.1.** Поля в корректорах для исправления последствий искажения замкнутой орбиты.

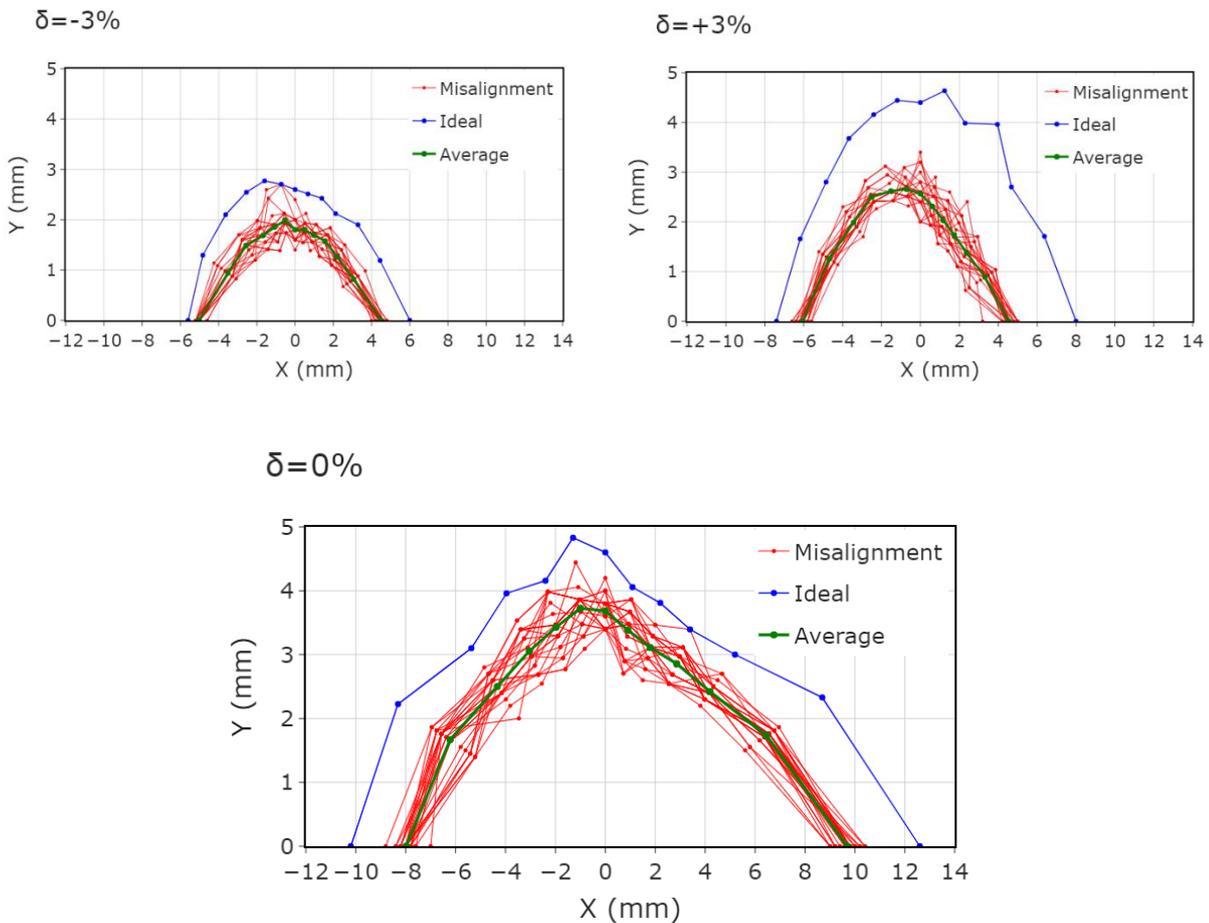
Коррекция в секступолях		Отдельные корректоры
$G_{\text{skew-max}}$ , Гс/см	60	-
$G_{\text{norm-max}}$ , Гс/см	30	-
$B_{\text{hor-max}}$ , Гс	60	300
$B_{\text{ver-max}}$ , Гс	55	280

**Таблица 2.5.2.2.** Параметры кольца СКИФ после исправления искажения замкнутой орбиты.

Остаточное ср.кв. искажение орбиты по $x$ , мкм	80
Остаточное ср.кв. искажение орбиты по $y$ , мкм	98
Горизонтальный эмиттанс, пм	$74 \pm 2$
Коэффициент связи бетатронных колебаний, %	0.1
Остаточные биения бета-функций, %	1

Важным аспектом искажения и коррекции орбиты является уменьшение динамической апертуры накопителя. Для изучения этого вопроса для каждой из 24-рех выборок случайного отклонения выставки магнитных элементов моделировалась динамическая апертура при трех значениях энергии частицы – проектной и отклоненной на  $\pm 3\%$ . Для неравновесной энергии учитывались и бетатронные, и синхротронные колебания. Результаты приведены на **Рисунке 2.5.2.3**.

Из графиков видно, что, хотя динамическая апертура уменьшается, она все-таки остается больше той, которая необходима для надежной эффективной инжекции ( $>7$  мм по горизонтали для номинальной энергии).



**Рисунок 2.5.2.3.** Уменьшение динамической апертуры после искажения и коррекции замкнутой орбиты. Вверху – для относительного отклонения энергии на  $\pm 3\%$ . Внизу – для номинальной энергии. Синяя кривая показывает апертуру для невозмущенной структуры, зеленая – среднее значение по 24-м выборкам.

### 2.5.3 Коррекция линейной связи бетатронных колебаний

Связь поперечных мод бетатронных колебаний описывает эффекты, которые могут возникнуть, когда вертикальное движение зависит от горизонтального, и наоборот. Такая связь приводит к переносу горизонтального бетатронного движения и дисперсии в вертикальную

плоскость: в обоих случаях результатом является увеличение вертикального эмиттанса. Основными источниками связи в накопительных кольцах являются неточности выставки квадруполей по углу вокруг оси пучка и секступолей по вертикали.

Частица, проходящая через скью-квадруполь (квадруполевая линза, повернутая вокруг оси пучка), приобретет вертикальный импульс, пропорциональный горизонтальному смещению (левый **Рисунок 2.5.3.1**) и квантовое возбуждение горизонтального эмиттанса приведет к увеличению вертикального.

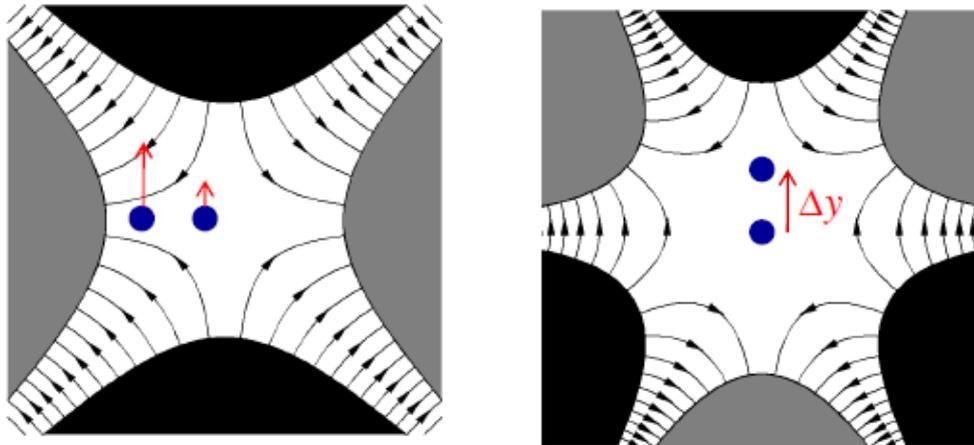
Вертикальное смещение пучка в секступолях приводит к такому же эффекту (правый **Рисунок 2.5.3.1**), так как поле в секступоле определяется выражениями:

$$B_x = k_2xy \quad \text{и} \quad B_y = \frac{1}{2}k_2(x^2 - y^2).$$

Смещение по вертикали можно представить, как  $y \rightarrow y + \Delta y$  и тогда компоненты поля на траектории частицы запишутся, как

$$B_x = k_2\Delta yx + k_2xy \quad \text{и} \quad B_y = -k_2\Delta y \cdot y + \frac{1}{2}k_2(x^2 - y^2) - \frac{1}{2}k_2\Delta y^2.$$

Первые слагаемые в каждом выражении представляют собой скью-квадруполевую компоненту  $k_s = k_2\Delta y$ .

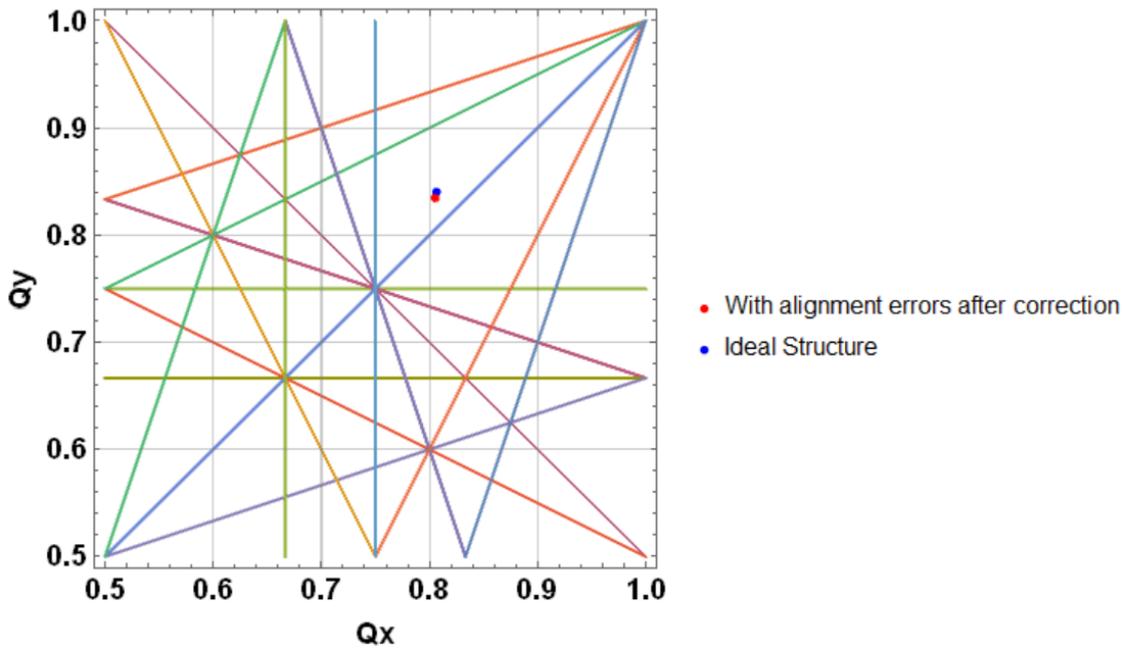


**Рисунок 2.5.3.1.** Прохождение частицы через скью-квадруполь. Приращение вертикального импульса зависит от горизонтального смещения частицы.

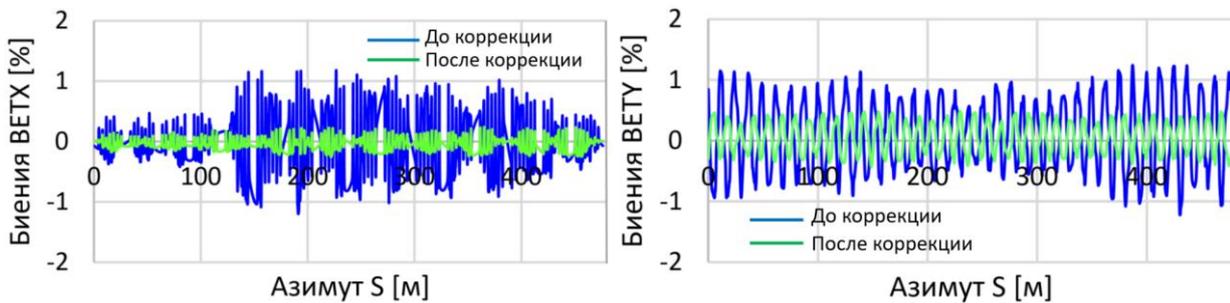
С помощью программы MADX была проведена коррекция магнитной структуры со связью, возбуждаемой угловым возмущением квадруполей 100  $\mu$ рад и вертикальным смещением секступолей 40  $\mu$ м (среднеквадратичные значения). Градиенты скью-корректоров, (в накопителе СКИФ их 256), варьировались в пределах  $\pm 100$  Гс/см. В **Таблице 2.5.3.1** приведены значения эмиттансов до и после коррекции связи в кольце. Результаты расчетов показали, что для подавления связи в данном случае, градиенты корректоров не превосходят  $\pm 30$  Гс/см.

**Таблица 2.5.3.1.** Значения эмиттансов в структуре с угловым возмущением квадруполей 150 мрад и вертикальном смещении секступолей 40 мкм до и после коррекции.

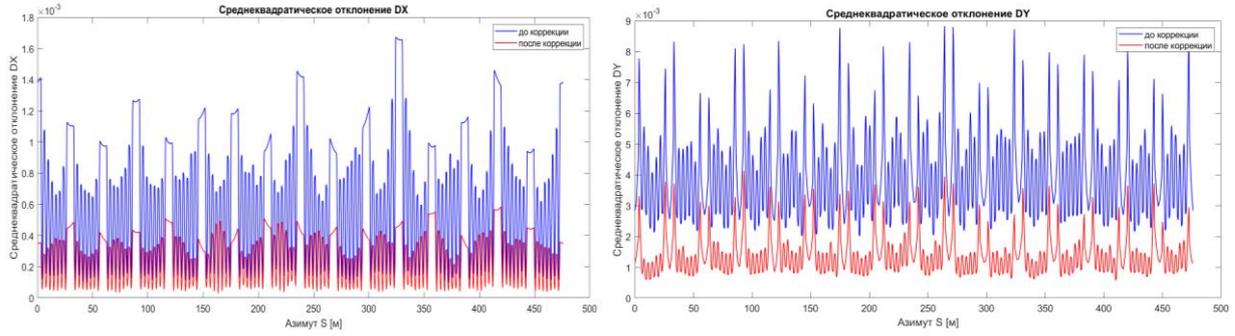
	До корр.	После корр.
$\epsilon_x$ , ПМ	68.2	72.6
$\epsilon_y$ , ПМ	21.0	0.0913
Коэффициент связи $\kappa$ , %	31.34	1.0



**Рисунок 2.5.3.2.** Сетка резонансов для структуры СКИФ. Синяя точка – рабочие частоты в идеальной структуре без связи и ошибок выставки элементов; красная точка – частоты, соответствующие вертикальному смещению секступолей 40 мкм (горизонтальное смещение отсутствует) и повороту квадруполей на 150 мрад.



**Рисунок 2.5.3.3.** Биеция горизонтальной и вертикальной бета функций при вертикальном смещении секступолей 40 мкм и угловом возмущении квадруполей 150 мкрад до (синяя линия) и после (зеленая линия) коррекции. 256 скью-корректоров.



**Рисунок 2.5.3.4.** Среднеквадратическое отклонение горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) дисперсии при вертикальном смещении секступолей 40  $\mu\text{м}$  и поворотом квадруполей на 150  $\mu\text{м}$ . Синяя линия – до коррекции; красная – после. 256 скью-корректоров

Анализируя **Таблицу 2.5.3.1**, видим, что вертикальное смещение секступолей и вращение квадруполей приводит к возникновению сильной связи, которую удается подавить до уровня 1% и ниже. После коррекции 256 скью-корректорами рабочая точка частот близка к частотам идеальной структуры основного кольца СКИФ (**Рисунок 2.5.3.2**). Также с помощью коррекции удалось подавить сильные искажения бета-функций и горизонтальной дисперсии и на порядок уменьшить величину вертикальной дисперсии, по сравнению со случаем до коррекции (**Рисунки 2.5.3.3 и 2.5.3.4**).

Получив приемлемое решение для 256 скью-корректоров, мы решили исследовать вопрос минимизации их числа.

Движение в фазовом пространстве для идеальной линейной структуры определяется квадратичным гамильтонианом [11]

$$H_0(\bar{x}; s) = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2} - \frac{\Delta b_2(s)}{2(1+\delta)}(x^2 - y^2) + O(x)^3.$$

Скью-квадрупольные ошибки (из-за наклонов квадруполей и сдвига вертикальной орбиты в секступолях) в гамильтониане выражаются следующей добавкой

$$H(\bar{x}; s) = H_0(\bar{x}; s) + \varepsilon V(x, y; s) = H_0(\bar{x}; s) - \Delta a_2(s)xy.$$

Вертикальная дисперсия в точке наблюдения  $k$  при расположении скью-квадрупольной ошибки в точке  $j$  определяется формулой [11]:

$$\Delta \eta_{y,k} = - \frac{(\Delta a_2 L)_j \eta_{x,j} \sqrt{\beta_{y,j} \beta_{y,k} \cos(|\mu_{y,j \rightarrow k}| - \pi \nu_y)}}{2 \sin(\pi \nu_y)} + O(\Delta a_2 L)^2, \quad (1)$$

где индекс  $j$  относится к точке возмущения, а  $k$  – к точке наблюдения.

Согласно [11] элементы матрицы отклика от скью-корректоров находятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_k}{\partial p_{x,i}} &= -(\Delta a_2 L) \sqrt{\beta_{x,i} \beta_{x,j} \beta_{y,j} \beta_{y,k}} \times \frac{\cos(|\mu_{x,i \rightarrow j}| - \pi \nu_x) \cos(|\mu_{y,j \rightarrow k}| - \pi \nu_y)}{4 \sin(\pi \nu_x) \sin(\pi \nu_y)} \\ &\quad + O(\Delta a_2 L)^2, \\ \frac{\partial x_k}{\partial p_{y,i}} &= -(\Delta a_2 L) \sqrt{\beta_{y,i} \beta_{y,j} \beta_{x,j} \beta_{x,k}} \times \frac{\cos(|\mu_{y,i \rightarrow j}| - \pi \nu_y) \cos(|\mu_{x,j \rightarrow k}| - \pi \nu_x)}{4 \sin(\pi \nu_x) \sin(\pi \nu_y)} \\ &\quad + O(\Delta a_2 L)^2. \end{aligned} \tag{2}$$

Из выражений (1) и (2) следует, что для эффективного управления бетатронной связью и вертикальной дисперсией необходимо иметь две группы скью-квадрупольных корректоров, как это показано в **Таблице 2.5.3.2**.

**Таблица 2.5.3.2.** Критерии отбора скью-квадрупольных корректоров. Знаки «+» и «-» означают сильный и слабый эффект.

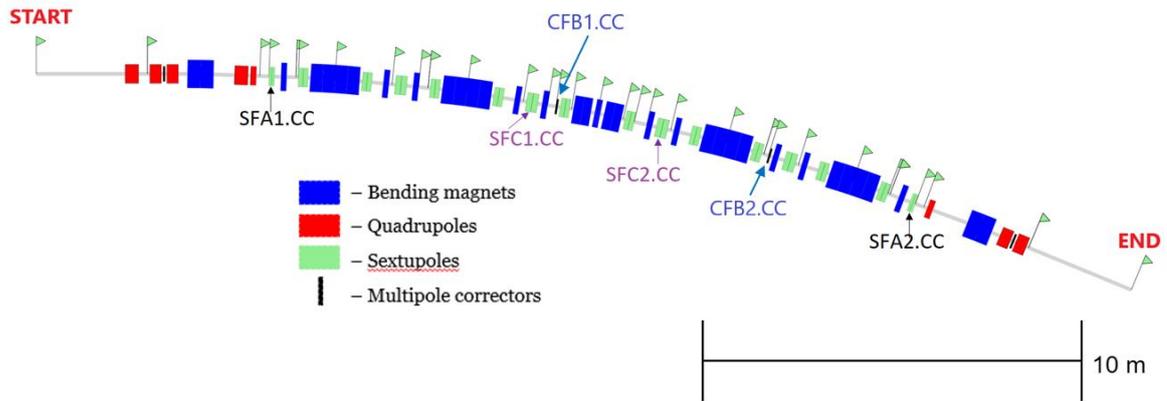
Коэфф.	Бет.связь	Вер.дисп. $\eta_y$	Фазовые условия
$\sqrt{\beta_x \beta_y}$	+	-	$\mu_{x,j+1} \pm \mu_{y,j+1} - (\mu_{xj} \pm \mu_{yj}) \neq n\pi$
$ \eta_x \sqrt{\beta_y} $	-	+	$\mu_{y,j+1} - \mu_{y,j} \neq n\pi$

Из **Таблицы 2.5.3.2** видно, что для эффективной минимизации связи в ускорителе, необходимо выбирать скью-квадрупольные корректоры, для которых коэффициент  $\sqrt{\beta_x \beta_y}$  большой, а для подавления вертикальной дисперсии большим должно быть выражение  $|\eta_x \sqrt{\beta_y}|$ . В соответствии с этим выводом нами был проведен анализ как указанных выше коэффициентов, так и фазовых соотношений для всего набора скью-квадрупольных корректоров, размещенных на магнитопроводе 256-ти секступольных линз. Результаты этого анализа приведены в **Таблицах 2.5.3.3 и 2.5.3.4**.

**Таблица 1.5.3.3.** Коэффициенты.

Секступоли	Семейство	$\sqrt{\beta_x \beta_y}$	$ \eta_x \sqrt{\beta_y} $
SFA1; SFA2	SFh	4.905	0.075531
CFB1		4.8396	0.0712
CFB2		4.9865	0.0756
SDA1; SDB1; SDC1; SDD1; SDE1; SDE2; SDD2; SDC2; SDB2; SDA2	SDh	4.48022	0.0643
SFB1; SFC1; SFC2; SFB2	SF	4.902	0.075487

Из таблиц видно, что корректоры в секступолях SFC1 и SFC2 оптимально использовать для подавления вертикальной дисперсии, так как набег вертикальных бетатронных фаз между ними далек от  $n\pi$ , также удобно использовать быстрые корректора CFB1 и CFB2, так как они тоже удовлетворяют необходимым условиям. Для компенсации связи наилучшим вариантом являются скью-квадрупольные корректоры в секступолях SFA1 и SFA2. Расположение корректоров показано на **Рисунке 2.5.3.5**.



**Рисунок 2.5.3.5.** Расположение скью-квадрупольных корректоров на периоде СКИФ: SFC1.CC и SFC2.CC для подавления вертикальной дисперсии; SFA1.CC и SFA2.CC для компенсации бетатронной связи; дополнительно в обоих случаях будут задействованы быстрые корректоры CFB1.CC и CFB2.CC.

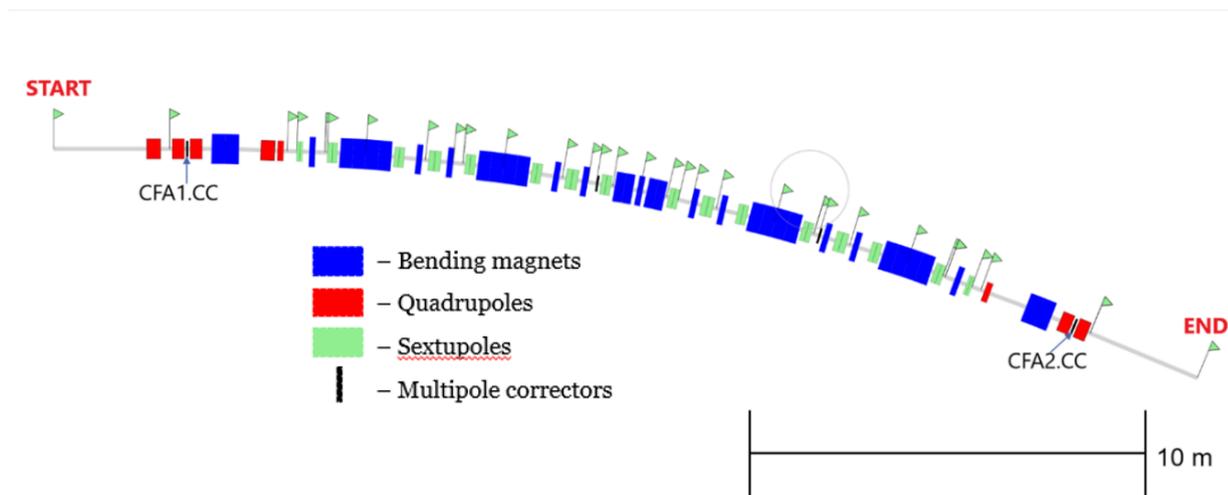
**Таблица 2.5.3.4.** Набеги бетатронных фаз между скью-корректорами.

Секступоли	$\mu_{y,j+1} - \mu_{y,j} \neq n\pi$	$\mu_{x,j+1} \pm \mu_{y,j+1} - (\mu_{x,j} \pm \mu_{y,j}) \neq n\pi$
SFA1; SFA2	4.3972 (n = 1.4)	18.1810 (n = 6); 9.3865 (n = 3)
SFA1; CFB1	2.021 (n = 0.64)	7.6149 (n = 2.42); 3.57 (n = 1.14)
CFB1; CFB2	1.2742 (n = 0.41)	6.6270 (n = 2.11); 4.0785 (n = 1.3)
CFB2; SFA2	1.1023 (n = 0.35)	3.9392 (n = 1.254); 1.735 (n = 0.55)
<b>SFB1; SFC1; SFC2; SFB2</b>		
SFB1; SFC1	0.8964 (n = 0.285)	3.6621 (n = 1.2); 1.8693 (n = 0.595)
SFC1; CFB1	0.262 (n = 0.1)	0.3313 (n = 0.11); 0.2 (n = 0.06)
CFB1; SFC2	0.62 (n = 0.2)	3.28 (n = 1.04); 2.05 (n = 0.65)
SFC2; CFB2	0.66 (n = 0.21)	3.37 (n = 1.07); 0.33 (n = 0.1)
SFC1; SFC2	0.8790 (n = 0.28)	3.6139 (n = 1.2); 1.8558 (n = 0.591)
SFC2; SFB2	0.8964 (n = 0.285)	3.6621 (n = 1.2); 1.8693 (n = 0.595)
<b>SDA1; SDB1; SDC1; SDD1; SDE1; SDE2; SDD2; SDC2; SDB2; SDA2</b>		
SDA1; SDB1	0.2400 (n = 0.076)	2.7806 (n = 0.88); 2.3005 (n = 0.73)
SDB1; SDC1	0.6564 (n = 0.21)	0.8816 (n = 0.28); -0.4312 (n = -0.14)
SDC1; SDD1	0.2400 (n = 0.076)	2.7806 (n = 0.88); 2.3005 (n = 0.73)
SDD1; SDE1	0.6419 (n = 0.2)	0.8677 (n = 0.276); -0.4161 (n = -0.13)
SDE1; SDE2	0.2517 (n = 0.08)	2.7601 (n = 0.87); 2.2568 (n = 0.72)
SDE2; SDD2	0.6419 (n = 0.2)	0.8677 (n = 0.276); -0.4161 (n = -0.13)
SDD2; SDC2	0.2400 (n = 0.076)	2.7806 (n = 0.88); 2.3005 (n = 0.73)
SDC2; SDB2	0.6564 (n = 0.21)	0.8816 (n = 0.28); -0.4312 (n = -0.14)
SDB2; SDA2	0.2400 (n = 0.076)	2.7806 (n = 0.88); 2.3005 (n = 0.73)

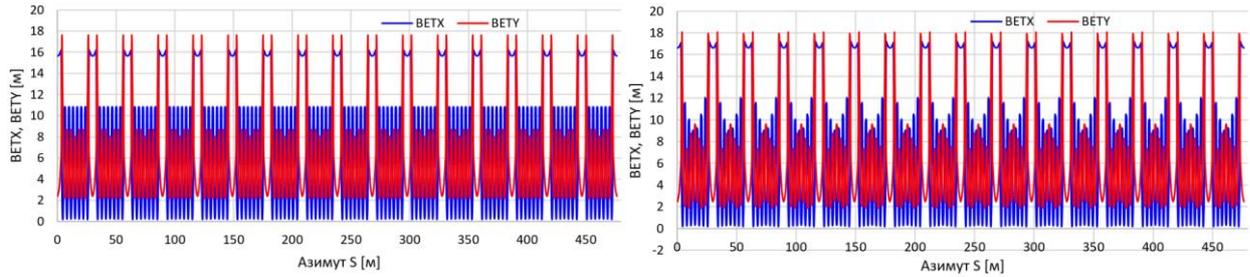
После определения такого ограниченного набора скью-корректоров было проведено моделирование коррекции оптики и бетатронной связи с использованием корректоров SFC1.CC и SFC2.CC, SFA1.CC и SFA2.CC, CFB1.CC и CFB2.CC. Ошибки юстировки случайным образом задавались в квадрупольные и секступольные линзы в соответствии с распределением Гаусса, «обрезанным» на  $2\sigma$ . Поскольку подобные ошибки выставки вызывают искажение замкнутой орбиты, сначала корректировалась она (дипольными корректорами) с помощью программы MADX [12], которая позволяет корректировать и находить замкнутую орбиту различными методами (MICADO, SVD, LSQ). Нами был выбран метод SVD. После нахождения новой замкнутой орбиты производилась коррекция оптических функций и бетатронной связи. В результате выбранным набором скью-корректоров удалось подавить отношение вертикального эмиттанса к горизонтальному до уровня менее 1%.

Удобным инструментом для коррекции бетатронной связи не влияющим на вертикальную дисперсию являются скью-квадрупольные корректоры CFA1.CC и CFA2.CC, расположенные в бездисперсионных промежутках ( $\eta_x = 0$ , **Рисунок 2.5.3.6**). Выбранные корректоры были разделены на два семейства: первое содержит CFA1, а второе – CFA2. Используя эти два набора корректоров можно возбуждать бетатронную связь от 1% до 100% без значительного искажения оптических функций (легко корректируются близкорасположенными квадрупольными линзами) и возбуждения вертикальной дисперсии  $\eta_y$  (**Рисунок 2.5.3.7**). Для 100 %-тной связи заметно небольшое искажение оптики, в то время, как для связи эмиттансов 10% возмущение бетатронных функций практически не наблюдается. Управление величиной горизонтального и вертикального эмиттансов важно с точки зрения оптимизации яркости СИ и времени жизни по эффекту Тушека. Градиенты скью-корректоров не превосходят 185 Гс/см.

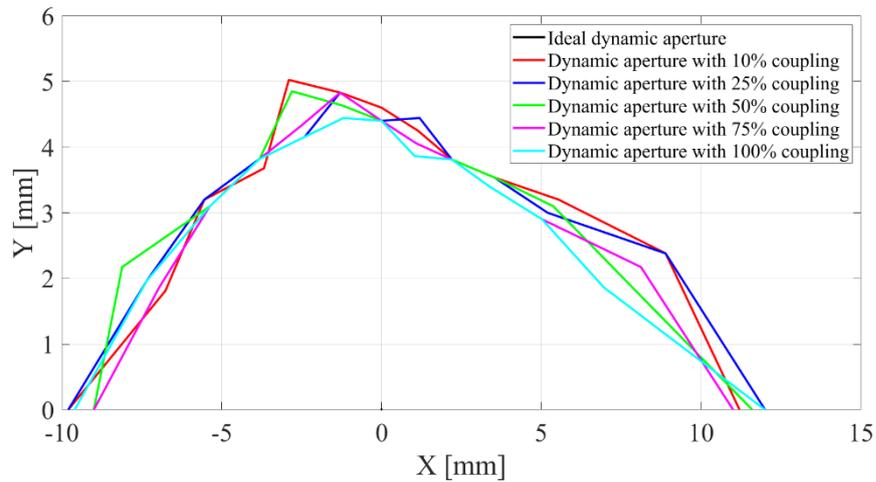
Возбуждение сильной бетатронной связи может привести к уменьшению динамической апертуры, поскольку при этом появляются резонансы связи. Для рассматриваемого метода возбуждения связи динамическая апертура остается практически неизменной даже при 100% связи, как это показано на **Рисунке 2.5.3.8**.



**Рисунок 2.5.3.6.** Скью-квадрупольные корректоры в бездисперсионных промежутках.



**Рисунок 2.5.3.7.** Поведение бетатронных функций для связи эмиттансов 10% (слева) и 100% (справа), возбужденной скью-квадрупольными корректорами в бездисперсионных промежутках.



**Рисунок 2.5.3.8.** Поперечная динамическая апертура накопителя СКИФ для различных значений отношения вертикального и горизонтального эмиттансов (вплоть до 100%), управляемого скью-квадрупольными корректорами в бездисперсионных промежутках.

## 2.6 Малые динамические смещения магнитных элементов

### 2.6.1 Динамические смещения магнитов накопителя электронов

Положение электронного пучка – источника излучения – должно быть стабилизировано во времени на азимутах вывода СИ с высокой точностью. Стандартным требованием является поперечная стабильность пучка электронов лучше 10% от его размера:  $\Delta\sigma \leq 0.1 \times \sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичный размер пучка. Согласно этому требованию и **Таблице 2.6.1.1**, максимально допустимое отклонение орбиты от равновесной в местах постановки вставных устройств  $0.42 \mu\text{m}$ , а в местах вывода СИ из диполей в центре ячейки  $0.57 \mu\text{m}$ .

**Таблица 2.6.1.1.** Размеры пучка в точках вывода излучения.

	$\sigma_x (\mu\text{m})$	$\sigma_{x'} (\mu\text{rad})$	$\sigma_y (\mu\text{m})$	$\sigma_{y'} (\mu\text{rad})$
IDs	33.7	2.2	4.2	1.7
Диполи	5.7	22.8	7.7	1

Для оценки влияния измеренных вибраций используется понятие спектральной плотности мощности колебаний. Спектральное распределение амплитуд колебаний получается с помощью преобразования Фурье колебаний, зависящих от времени:

$$Y(f) = \int_{-T/2}^{T/2} y(t) \cdot e^{-2\pi i f t} dt.$$

Спектральная плотность мощности (Power Spectral Density, PSD) определяется как:

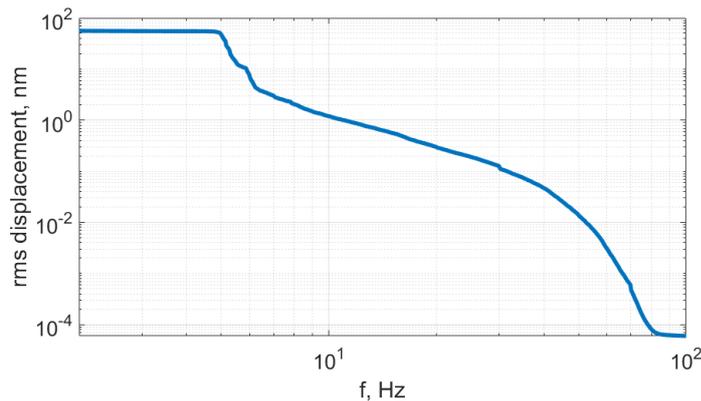
$$S_Y(f) = 2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} [Y(f)]^2.$$

Таким образом величина RMS вибраций в определенном спектральном диапазоне вычисляется по формуле:

$$Y_{RMS}(f_1, f_2) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_Y(f) df}.$$

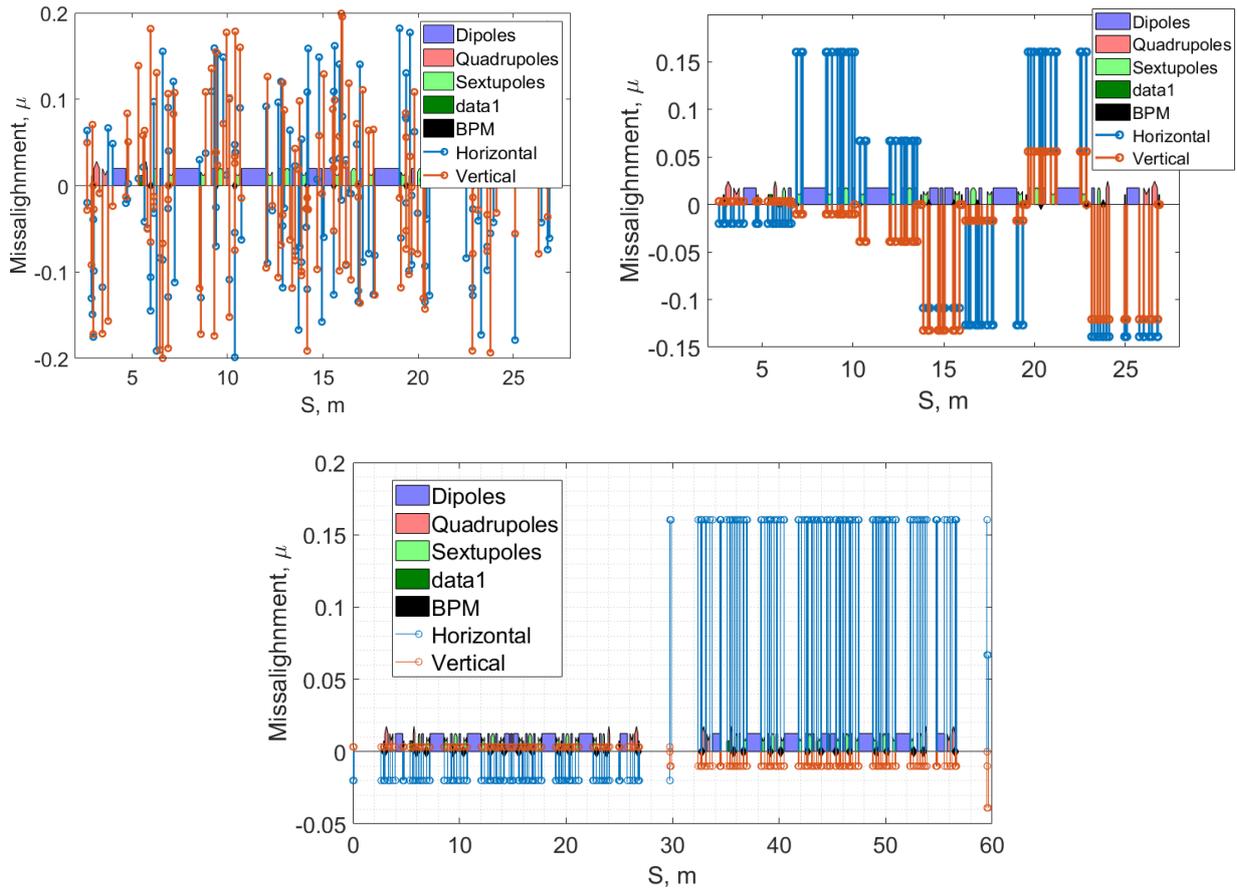
На **Рисунке 2.6.1.1** показан частотный спектр амплитуды колебаний земли, вызванных проходом поезда и измеренных сейсмометром, установленным вблизи строительной площадки СКИФ (примерно 2 км по прямой от железной дороги). Видно, что максимальное смещение (около 100 нм) сосредоточено в области низких частот, а именно до 10 Гц.

Кроме внешних вибрационных шумов от автомобильного трафика, поезда или предприятий вблизи кольца СКИФ, источники микровибраций будут размещаться в самом здании накопительного кольца СКИФ (трансформаторы источников питания, деловая активность и т. д.). Поэтому исследование (теоретическое и экспериментальное) источников вибрационного шума и его влияние на поведение пучка в накопителе СКИФ представляет несомненный практический интерес. Характерная скорость распространения акустических волн в бетоне около 5000 м/с, а это значит, что в диапазоне интересующих нас частот (до сотен герц) длины волн будут возмущать элементы магнитной структуры накопителя коррелировано.



**Рисунок 2.6.1.1.** Амплитудный спектр движения земли вблизи площадки СКИФ из-за прохода поезда на дистанции 2 км.

Для выяснения вопроса о влиянии корреляции в смещении магнитов на возмущение замкнутой орбиты было проведено моделирование для трех случаев: (1) каждый элемент смещается независимо от остальных, (2) магниты размещены на длинных (4-5 м) фермах («гирдерах») и движутся как целое, (3) весь суперпериод смещается одновременно (случай длинных волн).



**Рисунок 2.6.1.2.** Пример распределения ошибок: движение некоррелированное (вверху слева), гирдер смещается как целое (вверху справа), суперпериод смещается коррелировано (внизу).

Был проведен статистический анализ для 100 выборок; элементы сдвигались случайным образом по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением 100 нм, «обрезанным» на уровне  $3\sigma$ . Пример распределения ошибок приведен на **Рисунке 2.6.1.2**.

**Таблица 2.6.1.2.** Среднеквадратичное отклонение орбиты из-за независимых и коррелированных смещений магнитов СКИФ на  $\sigma_{x,y} = 100$  нм (100 выборок).

Источ.		Требование	Независ.	Гирдер	Арка
IDs	X, $\mu\text{м}$	3.37	11.9	9.59	0.235
	Y, $\mu\text{м}$	0.42	5.3	1.74	0.288
	X', $\mu\text{рад}$	0.22	0.77	0.59	0.016
	Y', $\mu\text{рад}$	0.17	2.3	0.74	0.127
Диполи	X, $\mu\text{м}$	0.57	1.59	1.23	0.122
	Y, $\mu\text{м}$	0.77	9.91	3.23	0.658
	X', $\mu\text{рад}$	2.28	6.34	4.79	0.121
	Y', $\mu\text{рад}$	0.1	1.22	0.4	0.067

Из **Таблицы 2.6.1.2** видно, что коротковолновые возмущения, при которых не коррелируемым образом смещаются либо все элементы, либо гирдер приводит к тому, что среднеквадратичное отклонение пучка от замкнутой орбиты в местах излучения в разы превышает заданное требование на стабильность. В **Таблице 2.6.1.3** представлены аналогичные результаты для возмущений меньшей амплитуды, равной 20 нм. При сравнении **Таблиц 2.6.1.2 и 2.6.1.3** видно, что зависимость среднеквадратичного отклонения орбиты в местах излучения от величины заданного возмущения является приблизительно линейной.

Кроме того, из результатов моделирования видно, что даже в случае очень жесткого требования (20 нм) на амплитуду низкочастотных поперечных колебаний магнитных элементов СКИФ не гарантирована стабильность пучка электронов в необходимых пределах (10% от размера источника). Причем ввиду малости вертикального эмиттанса, проблемы возникают, прежде всего, для вертикальной координаты. Для решения этого вопроса необходимо разработать и реализовать систему обратной связи, которая по измерениям датчиков положения пучка корректирует орбиту в точках излучения с помощью «быстрых» магнитно-корректоров.

**Таблица 2.6.1.3.** Среднеквадратичное отклонение орбиты из-за независимых и коррелированных смещений магнитов СКИФ на  $\sigma_{x,y} = 20$  нм (100 выборки).

Источ.		Требование	Независ.	Гирдер	Арка
IDs	X, $\mu\text{м}$	3.37	2.39	1.92	0.047
	Y, $\mu\text{м}$	0.42	1.07	0.35	0.058
	X', $\mu\text{рад}$	0.22	0.15	0.12	0.003
	Y', $\mu\text{рад}$	0.17	0.45	0.15	0.025
Диполи	X, $\mu\text{м}$	0.57	0.32	0.25	0.024
	Y, $\mu\text{м}$	0.77	1.98	0.65	0.132
	X', $\mu\text{рад}$	2.28	1.27	0.96	0.024
	Y', $\mu\text{рад}$	0.1	0.24	0.08	0.013

## 2.6.2 Система обратной связи (FOFB, Fast Orbit Feedback)

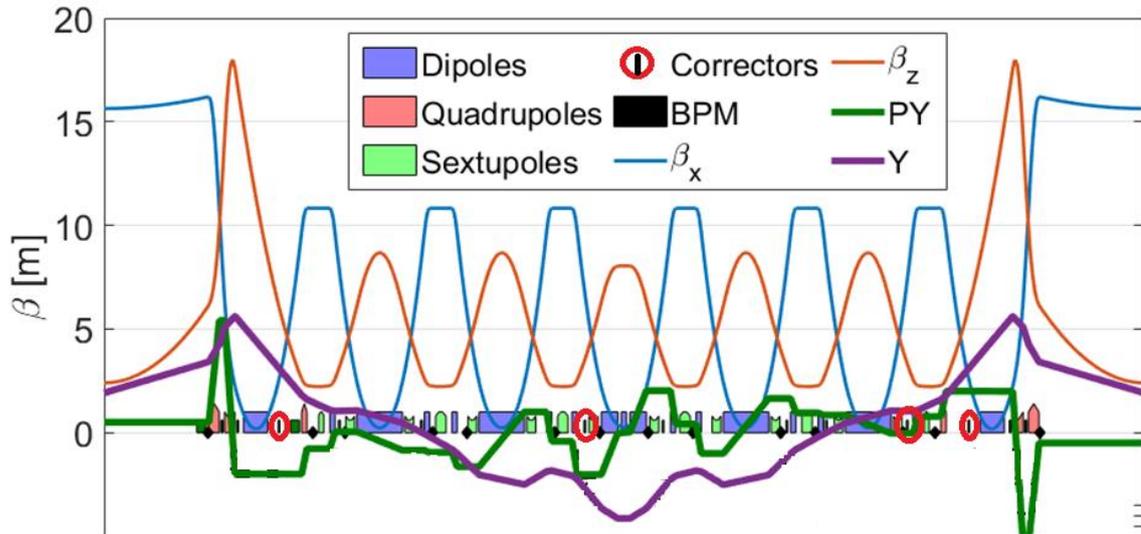
Система обратной связи призвана удерживать положение орбиты и пучка и направление излучения СИ в пределах, заданных потребителями ( $\leq 10\%$  от размера пучка) и, тем самым, предотвращать увеличение эффективного эмиттанса из-за малых колебаний магнитных элементов накопителя с частотами до 1000 Гц. Система состоит из четырех (для каждого суперпериода) слабых (ввиду малости амплитуды колебаний) широкополосных корректоров и набора датчиков положения электронного пучка (пикап-электродов). В будущем для более точной подстройки предполагается использовать также фотонные датчики положения пучка СИ.

При выборе мест расположения широкополосных корректоров, учитывались плотная компоновка магнитных элементов в структуре накопительного кольца, выводы синхротронного излучения, усложняющие конструкцию вакуумной камеры поведение оптических функций, определяющие эффективность корректора и т.п.

Эффективность влияния корректора на точку орбиты определяется известной формулой

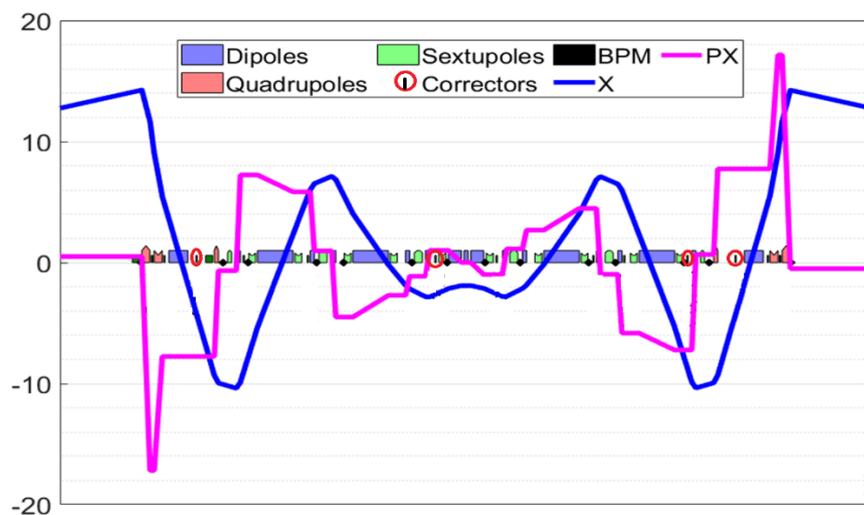
$$A_{ij} = \frac{\sqrt{\beta_i \beta_j}}{2 \sin \pi \nu} \cos [\pi \nu - |\phi_i - \phi_j|] = (U * W * V^T)_{ij}$$

и зависит от величин бета-функции, а также, взаимного набега бетатронной фазы.



**Рисунок 2.6.2.1.** Расстановка широкополосных корректоров обратной связи на суперпериоде янакопителя СКИФ и отклонение вертикальной орбиты.

На **Рисунке 2.6.2.1** показано размещение четырех «быстрых» корректоров FOFB, датчиков положения пучка, бетатронных функций и вертикальной орбиты, отклоняемой этими корректорами. Для горизонтальной координаты такие графики приведены на **Рисунке 2.6.2.2**.



**Рисунок 2.6.2.2.** Искажение горизонтальной орбиты, вызываемое четырьмя широкополосными корректорами системы обратной связи.

Результаты моделирования работы системы быстрой обратной связи показаны в **Таблицах 2.6.2.1 и 2.6.2.2** для случаев среднеквадратичного отклонения элементов 100 нм и 20 нм соответственно.

**Таблица 2.6.2.1.** Среднеквадратичное отклонение орбиты вследствие смещения магнитов СКИФ на 100 нм и последующей коррекции.

		Требование	Независ.	Гирдер
IDs	X, $\mu\text{м}$	3.37	0.26	0.08
	Y, $\mu\text{м}$	0.42	0.13	0.07
	X', $\mu\text{рад}$	0.22	0.22	0.06
	Y', $\mu\text{рад}$	0.17	0.03	0.02
Диполи	X, $\mu\text{м}$	0.57	0.58	0.10
	Y, $\mu\text{м}$	0.77	0.14	0.10
	X', $\mu\text{рад}$	2.28	1.76	0.23
	Y', $\mu\text{рад}$	0.1	0.14	0.04

**Таблица 2.6.2.2.** Среднеквадратичное отклонение орбиты вследствие смещения магнитов СКИФ на 20 нм и последующей коррекции.

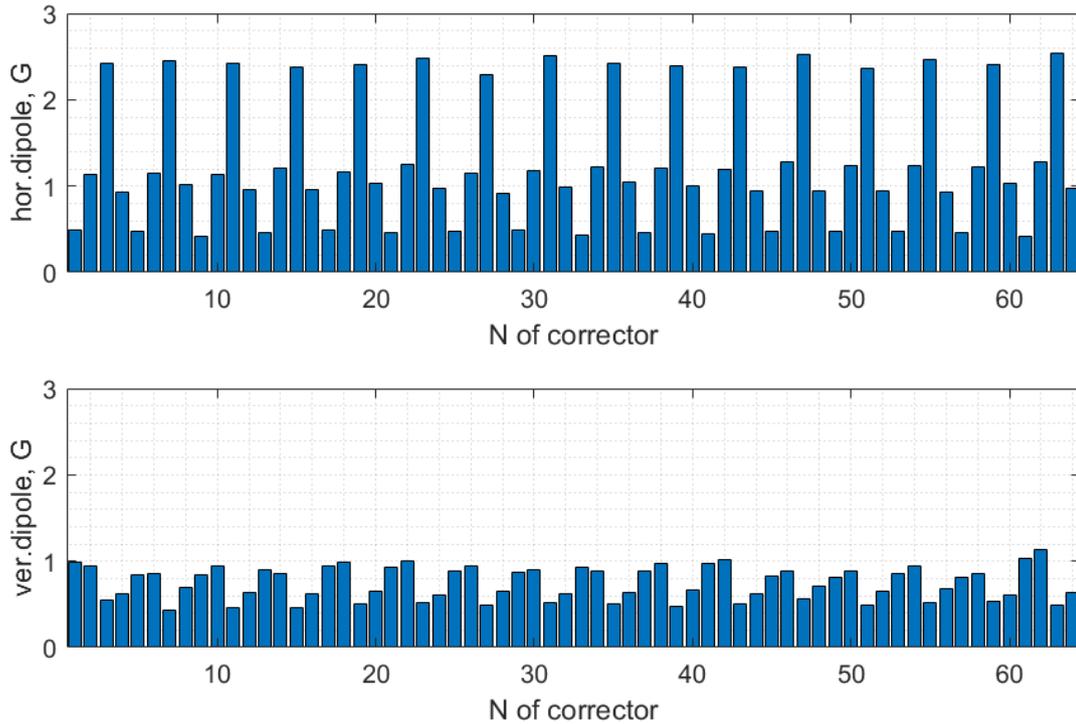
		Требование	Независ.	Гирдер
IDs	X, $\mu\text{м}$	3370	48	16
	Y, $\mu\text{м}$	420	17.5	13.7
	X', $\mu\text{рад}$	220	43.8	11.3
	Y', $\mu\text{рад}$	170	5.3	4.6
Диполи	X, $\mu\text{м}$	570	113.5	20.4
	Y, $\mu\text{м}$	770	18	20.2
	X', $\mu\text{рад}$	2280	355.4	45.1
	Y', $\mu\text{рад}$	100	27.7	7.7

Из **Таблицы 2.6.2.1** видно, что даже при случайном механическом смещении всех элементов структуры при  $\sigma = 100$  нм (что соответствует тому, что некоторые элементы могут отклоняться и на  $\pm 300$  нм), системы быстрой обратной связи достаточно, чтобы восстановить смещение орбиты в точках излучения до требуемого. При этом,  $\sigma$  величин сил корректоров, необходимые для коррекции орбиты, представлены на **Рисунке 2.6.2.3**.

В **Таблице 2.6.2.3** представлены требования к быстрым корректорам.

**Таблица 2.6.2.3.** Требования на быстрый корректор «СКИФ».

Макс.горизонтальное поле на оси пучка	20 Гс
Макс.вертикальное поле на оси пучка	20 Гс
Эффективная магнитная длина	5 см
Полная длина магнита	<7 см
Частотный диапазон	1000 Гц
Количество магнитов	64



**Рисунок 2.6.2.3.** Среднеквадратичное значение величины силы корректоров быстрой обратной связи, необходимой для случайного отклонения всех элементов с  $\sigma = 100$  нм.

## 2.7 Коллективные эффекты

Пучок заряженных частиц при движении в циклическом ускорителе возбуждает электромагнитные поля («следовые» wake-поля) внутри вакуумной камеры [17, 18], которые взаимодействуют с самим пучком, что приводит к различным коллективным эффектам, как правило, негативным. Наведенные поля и, следовательно, сила их воздействия на пучок зависит как от средней интенсивности пучка, так и от пиковой интенсивности отдельного сгустка в пучке. В случае, когда наведенное поле затухает относительно медленно по сравнению с частотой обращения пучка, могут возникать резонансные условия, которые приводят к усилению наведенных полей. Последствия для пучка от подобных эффектов могут быть разнообразными: потеря энергии частиц, деградация фазового объёма, уменьшение интенсивности, вплоть до полной гибели пучка, увеличение потерь пучка, возбуждение когерентных и некогерентных колебаний отдельных сгустков или всего пучка, сдвиг бетатронных частот и т.д. Стоит отметить, что некоторые из коллективных эффектов обладают пороговым эффектом.

Для описания взаимодействия [19, 20] релятивистских заряженных частиц с wake-полями используется понятие wake-функции, определенной как нормированный интеграл силы Лоренца, действующей на пробный заряд  $e$ , который движется на расстоянии  $s$  за точечным зарядом  $q$ , возбуждающим wake-поля. Скорость движения обоих зарядов полагается равной скорости света  $c$ . Wake-функция — это функция отклика структуры на возбуждение точечным зарядом, она определяется только формой и электромагнитными свойствами структуры, и не зависит от распределения зарядов в пучке. В случае пучка с произвольным распределением

плотности взаимодействие с wake-полями определяется wake-потенциалом  $V$ , представляющим собой свертку wake-функции  $W$  с нормированным продольным распределением плотности пучка  $\lambda(z)$

$$V(s) = \int_0^{\infty} W(s)\lambda(s-z)dz,$$

где ось  $z$  направлена по движению пучка, а нормировка функции  $\lambda(z)$  определена как

$$\int_0^{\infty} \lambda(s-z)dz = 1.$$

В большинстве практических случаев для анализа устойчивости движения пучка достаточно рассмотреть только монополярную продольную  $W_{\parallel}$  и дипольную поперечную  $W_{\perp}$  wake-функции. Поскольку магнитное поле перпендикулярно траектории частицы и не влияет на продольное движение, продольная wake-функция получается интегрированием компоненты электрического поля, параллельной скорости  $v$  движения частиц

$$W_{\parallel}(s) = -\frac{1}{q} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{v} \cdot \mathbf{E} dt = -\frac{1}{q} \int_{-\infty}^{\infty} E_z dz, \quad v \simeq c.$$

Дипольная поперечная wake-функция определена аналогично продольной, как интеграл поперечных электромагнитных сил с нормировкой на заряд  $q$  и поперечное смещение  $r$ , и представляет собой вектор, имеющий горизонтальную и вертикальную компоненты:

$$W_{\perp}(s) = -\frac{1}{qr} \int_{-\infty}^{\infty} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})_{\perp} dz.$$

Продольная и дипольная поперечная wake-функции связаны между собой теоремой Пановского-Венцеля

$$r \frac{\partial W_{\perp}}{\partial s} = \nabla_{\perp} W_{\parallel}.$$

Часто представляется удобным описывать взаимодействие пучка с wake-полями в частотной области, представляя компоненты вакуумной камеры в виде импедансов связи. Продольный  $Z_{\parallel}$  и поперечный  $Z_{\perp}$  импедансы являются Фурье-образами соответствующих wake-функций

$$Z_{\parallel}(\omega) = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\parallel}(s) e^{i\omega s/c} ds,$$

$$Z_{\perp}(\omega) = -\frac{i}{c} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\perp}(s) e^{i\omega s/c} ds.$$

Каждый компонент вакуумной камеры представляет собой импеданс, являющийся комплексной сложной функцией частоты (частотной характеристикой). При отсутствии интерфе-

ренции wake-полей, возбуждаемых пучком в разных компонентах вакуумной камеры (удаленные друг от друга компоненты или быстрозатухающие wake-поля), импедансы аддитивны при любых частотах. В этом случае импеданс всей вакуумной камеры может быть представлен суммой импедансов ее составных частей.

Основной вклад в суммарный импеданс вакуумной камеры накопителя вносят изменения поперечного сечения камеры, конечная проводимость стенок камеры, электромагнитные кикеры, пикапы, ВЧ-резонаторы, фланцы, сильфоны, отверстия выпуска-выпуска, окна вывода синхротронного излучения [21].

Для оценок устойчивости пучка принято использовать эффективный импеданс  $(Z_{\parallel}/n)_{eff}$ , который является взвешенным нормализованным импедансом, усредненным по спектру частот пучка

$$\left(\frac{Z_{\parallel}}{n}\right)_{eff} = \frac{\sum_{p=-\infty}^{\infty} Z_{\parallel}(\omega) \frac{\omega_0}{\omega_p} h_m(\omega_p)}{\sum_{p=-\infty}^{\infty} h_m(\omega_p)},$$

где  $Z_{\parallel}(\omega)$  – продольный импеданс,  $n = \omega/\omega_0$  – номер гармоники частоты обращения,  $\omega_p = p\omega_0 + m\omega_s$  – набор частот одиночного сгустка,  $h_m(\omega)$  – плотность спектральной мощности  $m$ -й моды колебаний,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – циклическая частота обращения пучка.

### 2.7.1 Расчет импедансов

В первом приближении мы представим импеданс накопителя ЦКП «СКИФ» в виде двух составляющих – импеданса ВЧ-резонаторов основной гармоники (5 резонаторов) и гладкой алюминиевой вакуумной камеры круглого сечения с диаметром  $\varnothing 27$  мм.

Резонаторы имеют  $\Omega$ -образную форму и снабжены тремя сдвоенными волноводами с СВЧ поглотителями в оконечной части для демпфирования высших мод (ВМ), возбуждаемых в резонаторах пролетающими сгустками электронов. Конфигурация резонаторов показана на **Рисунках 2.7.1.1 и 2.7.1.2**.

Параметры одного резонатора на основной моде приведены в **Таблице 2.7.1.1**.

Основные части резонатора (обечайка с левой торцевой стенкой, правая торцевая стенка, части волноводов для отвода ВМ к поглощающим нагрузкам) изготавливаются из бескислородной меди и соединяются между собой с помощью электронно-лучевой сварки и пайки в вакуумной печи, образуя неразборный корпус. Узлы резонатора (вакуумный насос, датчик вакуума, ввод мощности, датчик напряжения, тюнер основной моды, СВЧ-нагрузки) присоединяются к портам резонатора (круглым или прямоугольным) с помощью металлических уплотнений типа Conflat и HTMS, что позволяет проводить обезгаживающий прогрев резонатора в сборе. Вакуумный ионно-геттерный насос присоединяется к нижнему порту резонатора; для обеспечения откачки в обечайке резонатора выполнены продольные щели, не прерывающие ВЧ-токи основной моды. В стенках резонатора для отвода выделяющегося тепла выполнены каналы водяного охлаждения.

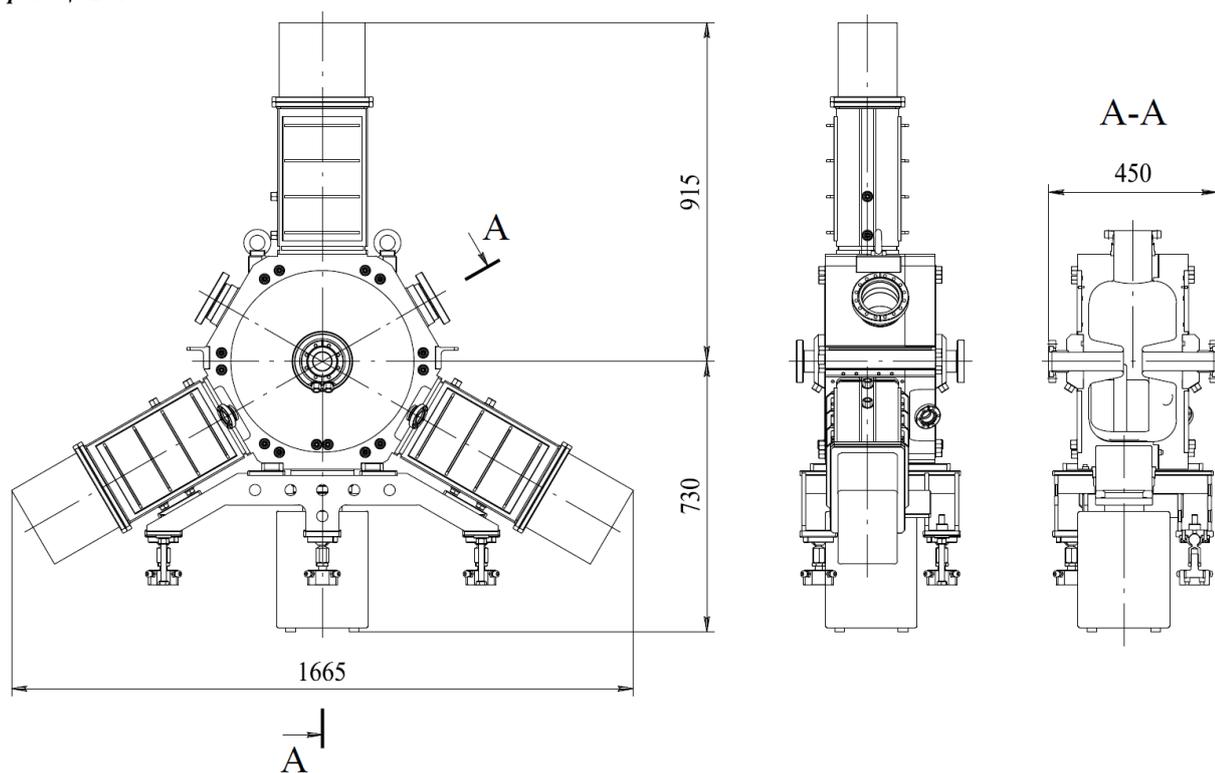


Рисунок 2.7.1.1. Эскиз резонатора основной гармоники с габаритными размерами.

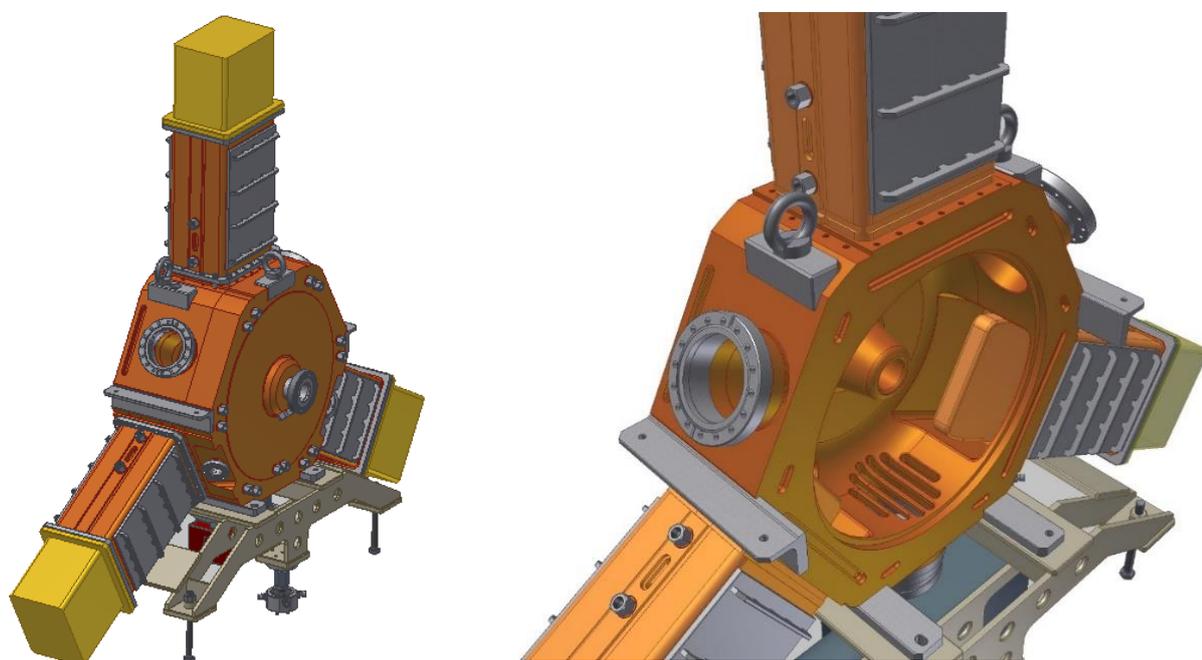


Рисунок 2.7.1.2. Трехмерная модель резонатора основной гармоники: слева – в сборе, справа – без торцевой стенки.

**Таблица 2.7.1.1.** Параметры резонатора основной гармонике на основной моде.

Рабочая частота, $f_0$	357 МГц
Диапазон перестройки частоты, $\Delta f$	1 МГц
Собственная добротность, $0.7 \cdot Q_0$ 3D-model	17 000
Характеристическое пролетное сопротивление, $R/Q$	150 Ом
Шунтовое пролетное сопротивление, $R$	2.55 МОм
Амплитуда ускоряющего напряжения, $V_m$	360 кВ
Мощность потерь в стенках на энергии выпуска, $P$	25.4 кВт
Максимальная плотность мощности потерь, $P_{max}$	12.7 Вт/см <sup>2</sup>
Максимальная мощность, передаваемая в пучок, $P_b$	112 кВт

Основные части резонатора (обечайка с левой торцевой стенкой, правая торцевая стенка, части волноводов для отвода ВМ к поглощающим нагрузкам) изготавливаются из бескислородной меди и соединяются между собой с помощью электронно-лучевой сварки и пайки в вакуумной печи, образуя неразборный корпус. Узлы резонатора (вакуумный насос, датчик вакуума, ввод мощности, датчик напряжения, тюнер основной моды, СВЧ-нагрузки) присоединяются к портам резонатора (круглым или прямоугольным) с помощью металлических уплотнений типа Conflat и HTMS, что позволяет проводить обезгаживающий прогрев резонатора в сборе. Вакуумный ионно-геттерный насос присоединяется к нижнему порту резонатора; для обеспечения откачки в обечайке резонатора выполнены продольные щели, не прерывающие ВЧ-токи основной моды. В стенках резонатора для отвода выделяющегося тепла выполнены каналы водяного охлаждения.

Расчёт спектра высших мод проводился с помощью программы CST Studio Suite. Вычисления проводились на сервере HPE ProLiant DL560 Gen10 8SFF с четырьмя процессорами Intel Xeon Gold 6254.

Расчётная модель (см. **Рисунок 2.7.1.3**) повторяет внутренний объём резонатора без портов откачки, тюнера, ввода мощности и измерительных петель. Порты убраны для упрощения расчётов. В качестве нагрузки заведён идеальный поглотитель. В реальности будут незначительные отражения от нагрузки, составляющие не более 10%. Расчёт импедансов проводился до частоты 3.8 ГГц, что является вполне достаточно для пучка длиной 15 мм, т.к. на этой частоте спектр пучка уже заметно снижен. Для пучка длиной 5 мм необходимо проводить расчёт до частот  $\sim 10$  ГГц, но это сильно увеличивает время расчетов.

Для относительно быстрой оценки всего спектра резонатора использовался алгоритм *wakefield solver*. Этот алгоритм рассчитывает wake-потенциал, который потом пересчитывается в импеданс. Снизив точность расчёта в данном случае можно за несколько часов получить оценку широкополосного продольного импеданса резонатора. На этапе начальной оптимизации резонатора это позволяет сравнительно быстро определять основные проблемы в спектре и вносить изменения в конструкцию для их устранения. Кроме того, данное моделирование позволяет учитывать влияние вакуумной камеры на спектр резонатора. Точный расчёт спектра резонатора этим алгоритмом требует до нескольких дней на один счёт (зависит от сложности геометрии, ширины спектра и добротности мод). Кроме того, при одном проходе

можно получить только продольный импеданс. Для получения поперечных импедансов, необходимо сделать ещё два прохода. Итого общее время расчёта импеданса может составить около 1-2 недель.

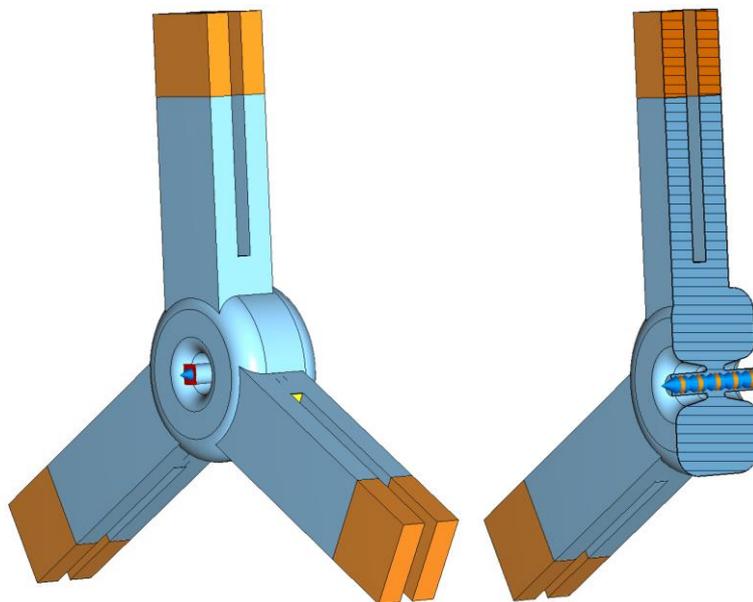


Рисунок 2.7.1.3. Трёхмерный вид расчетной модели резонатора основной гармоники.

Для вакуумной камеры накопителя критическая частота составляет 6.5 ГГц. Для расчёта импеданса резонатора в полосе до критической частоты вакуумной камеры, часто удобнее использовать алгоритм *eigenmode solver*. Этот алгоритм позволяет рассчитать моды резонатора и их параметры. Зная резонансную частоту, добротность и шунтовое сопротивление (продольное и два поперечных) всех мод в заданной полосе частот, можно рассчитать широкополосные импедансы резонатора. В полосе до 3.8 ГГц в резонаторе СКИФ около 1200 высших мод. Для их расчёта *eigenmode solver* достаточно 2-3 дня.

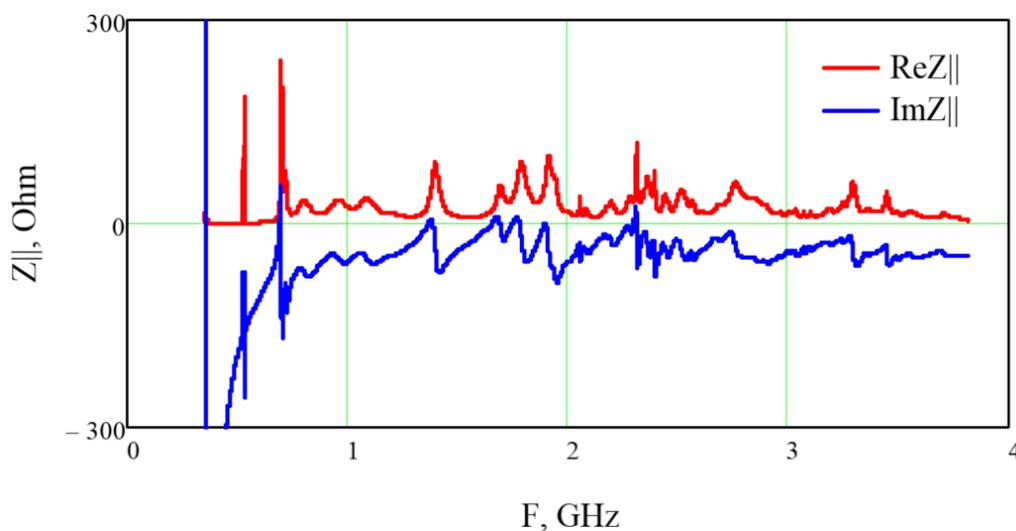
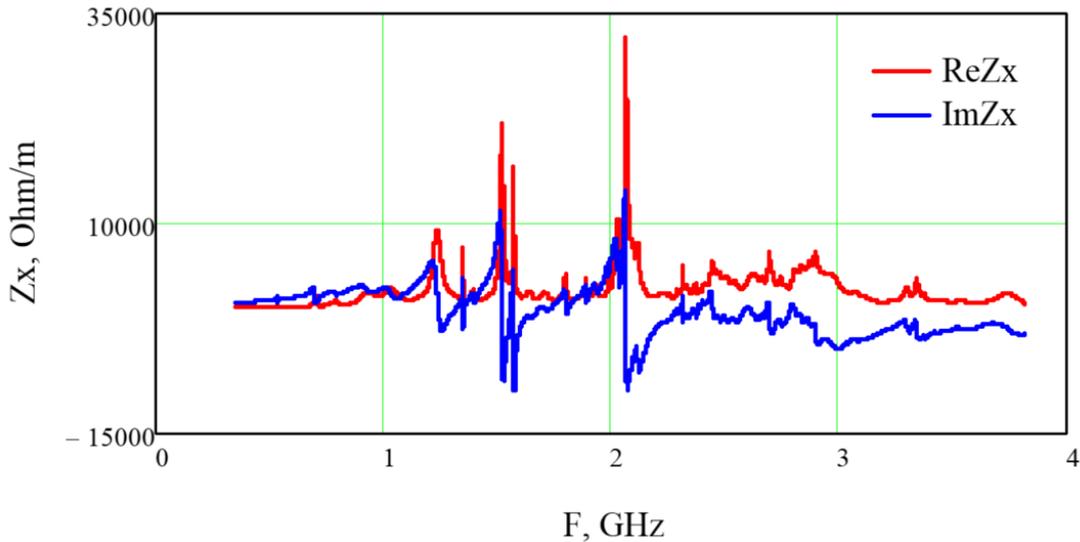
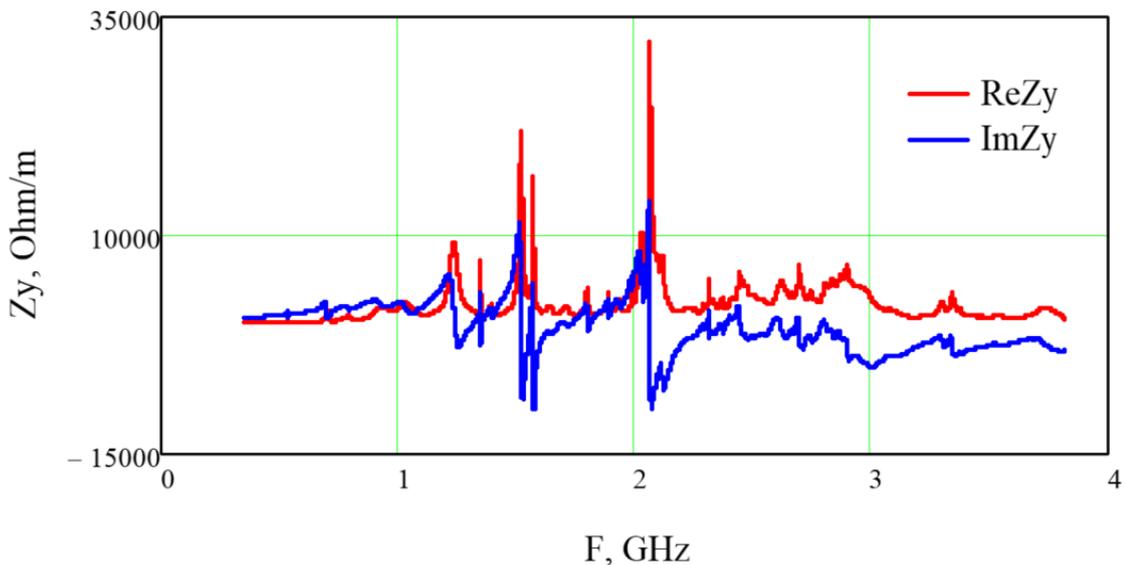


Рисунок 2.7.1.4. Спектр продольного импеданса ВЧ-резонатора основной гармоники.

На **Рисунке 2.7.1.4** показаны реальная (резистивная) и мнимая (реактивная) части продольного импеданса  $Z_{\parallel}$  одного ускоряющего резонатора основной гармоники в зависимости от частоты. Вертикальная шкала ограничена диапазоном  $\pm 300$  Ом. Импеданс основной гармоники 357 МГц находится вне этого диапазона и составляет  $3.4 \cdot 10^6$  Ом. Спектры горизонтального и вертикального импедансов ускоряющего резонатора СКИФ показаны на **Рисунках 2.7.1.5 и 2.7.1.6**.



**Рисунок 2.7.1.5.** Спектр горизонтального импеданса ВЧ-резонатора основной гармоники.



**Рисунок 2.7.1.6.** Спектр вертикального импеданса ВЧ-резонатора основной гармоники.

Оценка импеданса вакуумной камеры выполнена аналитически. Импеданс круглой вакуумной камеры с проводимостью  $\sigma$  равен

$$Z_{\parallel}(\omega) = (1 + i) \frac{Z_0 \delta_s(\omega)}{2b},$$

$$Z_x(\omega) = \frac{\pi^2}{24} (1 + i) \frac{Z_0 R \delta_s(\omega)}{b^3},$$

$$Z_y(\omega) = \frac{\pi^2}{12} (1 + i) \frac{Z_0 R \delta_s(\omega)}{b^3}.$$

где  $b$  – радиус вакуумной камеры,  $\delta_s$  – толщина скин-слоя,  $R = L/2/\pi$  – средний радиус ускорителя.

В первом приближение взята гладкая алюминиевая вакуумная камера круглого сечения с диаметром  $\varnothing 27$  мм. Продольный импеданс такой вакуумной камеры накопителя без резонаторов равен

$$Z_{\parallel}(f) = 1.45(1 - i) \sqrt{\frac{f}{f_0}} \text{ Ом},$$

Поперечный импеданс вакуумной камеры накопителя без резонаторов равен

$$Z_{\perp}(f) = 1.23 \cdot 10^6 (1 - i) \sqrt{\frac{f_0}{f}} \text{ Ом/м}.$$

### 2.7.2. Резистивная и когерентная неустойчивости

Резистивная (*resistive wall*) неустойчивость в циклическом ускорителе возникает из-за взаимодействия пучка с вакуумной камерой, обладающей конечной проводимостью стенок. Когерентная неустойчивость возникает из-за взаимодействия пучка с импедансом высокочастотных ускоряющих резонаторов. Расчеты проводились для базовой структуры накопителя ЦКП «СКИФ» без вставных устройств на энергии 3 ГэВ с полным током пучка 400 мА в основной моде заполнения: имеется последовательность из 510 сгустков с током 0.78 мА в каждом и 57 пустых сепаратрис. Используется основная ускоряющая система, удлиняющие резонаторы третьей гармоники отключены. Полное напряжение на резонаторах 770 кВ при потерях энергии на СИ 535 кэВ/оборот.

Когерентные потери за счет резистивного импеданса вакуумной камеры за оборот (оценка для симметричного пучка с тем же зарядом сгустка) в пересчете на 1 электрон

$$U_{loss,rw} = \frac{2I_0^2}{Q f_0} \sum_{p>0} \text{Re}(Z(pN_{b0}f_0)) e^{-p^2 N_{b0}^2 \sigma_z^2 / R^2} = 1.83 \text{ кэВ}.$$

Потери энергии из-за резистивного импеданса вакуумной камеры являются пренебрежимыми по сравнению с потерями энергии синхротронное излучение.

Когерентные потери от пяти ускоряющих резонаторов основной гармоники составляют

$$U_{loss,rf} = 1.9 \text{ кэВ},$$

что так же является малой величиной.

В Таблице 2.7.2.1 приведены расчеты для инкрементов колебаний, возникающих из-за резистивной неустойчивости вакуумной камеры и когерентной неустойчивости из-за ВЧ-резонаторов основной гармоники. Оценка выполнена для симметричного пучка с тем же зарядом одного сгустка.

Таблица 2.7.2.1. Декременты затухания и инкременты резистивной и когерентной неустойчивостей.

Направление	Частоты колебаний	Декремент затухания	Инкремент резистивной неустойчивости	Инкремент когерентной неустойчивости
Горизонтальное	51.445	$111 \text{ с}^{-1}$	$101.8 \text{ с}^{-1}$	$14.5 \text{ с}^{-1}$
Вертикальное	17.597	$53 \text{ с}^{-1}$	$349.4 \text{ с}^{-1}$	$9.2 \text{ с}^{-1}$
Продольное	0.0011	$62 \text{ с}^{-1}$	$0.002 \text{ с}^{-1}$	$\text{с}^{-1}$

### 2.7.3 Микроволновая неустойчивость

Электромагнитные поля, наведенные пучком, приводят к изменению формы ускоряющего поля, действующего на пучок. Этот эффект приводит к искажению продольного распределения частиц и к удлинению сгустка, в то время как энергетический разброс не меняется. Однако, если ток пучка превышает некоторую пороговую величину, то взаимодействие пучка с продольным импедансом приводит к микроволновой неустойчивости (МВН) продольного движения. Выше порога неустойчивости с увеличением тока растет как продольный размер, так и энергетический разброс пучка. Амплитудное значение порогового тока в сгустке по МВН может быть оценено по следующей формуле из-за продольного импеданса

$$I_{th,mwi} = \frac{2\pi \alpha E/e}{\left| \frac{Z_{\parallel}}{n} \right|_{eff}} \sigma_{\Delta E/E}^2,$$

и из-за поперечного импеданса

$$I_{th,mwi} = \frac{4\pi \alpha \omega_{\beta} E/e}{\left| \frac{Z_{\perp}}{n} \right|_{eff}} \sigma_{\Delta E/E},$$

где  $\alpha$  – коэффициент уплотнения орбит,  $E$  – энергия пучка,  $\sigma_{\Delta E/E}$  – энергетический разброс у пучке.

Оценим значение эффективного импеданса для проектных параметров накопителя ЦКП «СКИФ» с током пучка 400 мА в основной пучковой моде в 510 сгустках с током сгустка 0.78 мА, длина сгустка 6 мм. Амплитудное значение тока сгустка в этом случае составит 25 А. Значение эффективных импедансов из-за резистивного импеданса гладкой круглой вакуумной камеры

$$\left| \frac{Z_{\parallel}}{n} \right|_{eff} = 77 \text{ мОм}, \quad \left| \frac{Z_x}{n} \right|_{eff} = 52 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}, \quad \left| \frac{Z_y}{n} \right|_{eff} = 18 \text{ Ом/м}.$$

МВН может возникнуть на частотах выше частоты срезы  $f_c$

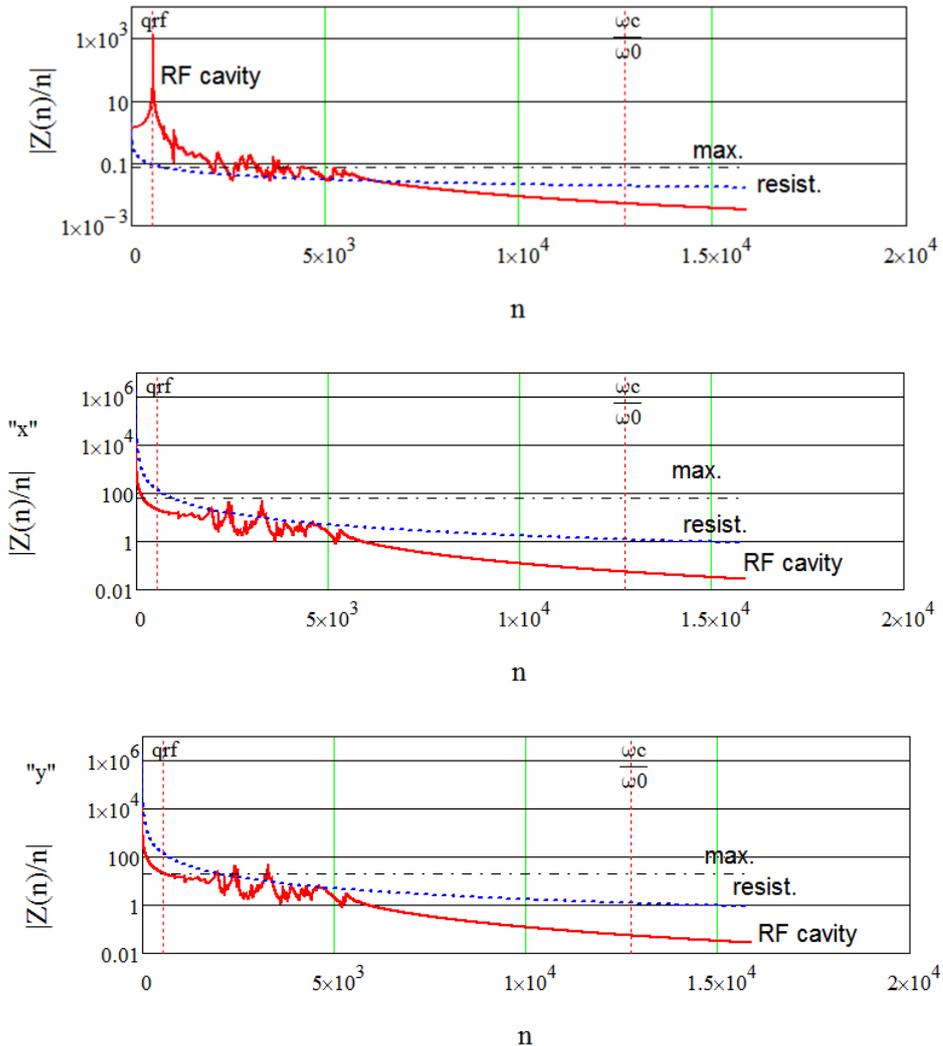
$$f_c = \frac{c}{2\pi\sigma_z}$$

где  $\sigma_z$  – длина сгустка. При  $\sigma_z = 6$  мм частота среза составляет 8 ГГц. Импедансы вакуумной камеры на частоте среза составляют

$$\left| \frac{Z_{\parallel}(f_c)}{f_c/f_0} \right| = 18 \text{ мОм}, \quad \left| \frac{Z_{\perp}(f_c)}{f_c/f_0} \right| = 1.2 \text{ Ом/м}$$

и не превышают пороги продольной и поперечной микроволновой неустойчивости.

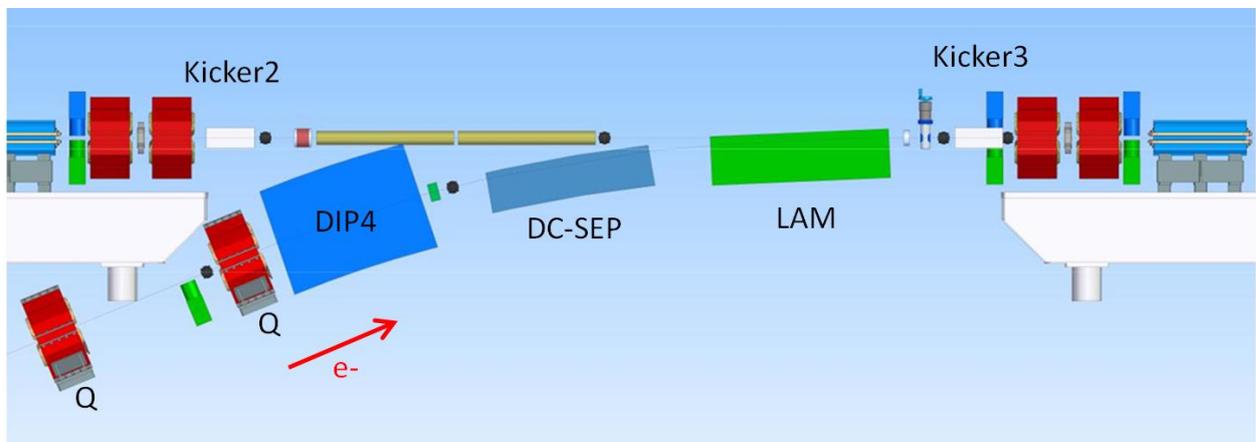
На **Рисунке 2.7.3.1** показаны нормализованный продольный, горизонтальный и вертикальный импеданс для пяти резонаторов основной гармоники (красный) и для резистивного импеданса вакуумной камеры (синий) от номера гармоники  $n$ . Черной пунктирной линией (max) показано максимальное значение нормализованного импеданса по микроволновой неустойчивости.  $\omega_c/\omega_0$  – частота среза, выше которой возможно развитие по микроволновой неустойчивости. Пороги продольной и поперечной микроволновой неустойчивости на частотах выше частоты среза не превышены.



**Рисунок 2.7.3.1.** Нормализованный продольный (вверху) и поперечный (x, y) импеданс для пяти ускоряющих ВЧ резонаторов основной гармоники и для резистивного импеданса вакуумной камеры.

## 2.8 Инжекция пучка в накопитель

Инжекция в накопитель СКИФ осуществляется на энергии эксперимента 3 ГэВ из бустерного синхротрона, который расположен в отдельном здании на глубине 4.5 м относительно медианной плоскости накопителя. Оба кольца соединены длинным (200 м) транспортным каналом ТК2, который проходит под фундаментом здания накопителя и поднимается на требуемую высоту непосредственно вблизи промежутка инъекции с внешней стороны накопителя. Транспортный канал и накопитель соединяются септум-магнитом Ламбертсона («септум-ламбертсон»). Впуск в накопитель осуществляется в стандартном прямолинейном промежутке без изменения оптики, но с увеличенной апертурой вакуумной камеры. На **Рисунке 2.8.1** показан вид сбоку (изнутри кольца) промежутка инъекции и транспортного канала. Подъём транспортного канала (финальная часть) осуществляется в одной плоскости с горизонтальным смещением 13 мм относительно оси прямолинейного промежутка накопителя.



**Рисунок 2.8.1.** Соединение канала ТК2 и накопителя. LAM – септум-магнит Ламбертсона, DC-SEP – септум постоянного тока, DIP4 – последний дипольный магнит канала.

Ввиду предельно малого времени для создания источника СИ мы вынуждены использовать хорошо проверенные решения, не требующие дополнительных исследовательских работ, разработки и испытания прототипов. Поэтому для инъекции пучка в основное кольцо СКИФ мы используем известную схему с локальным импульсным отклонением накопленного пучка по направлению к впускному магниту-септуму (injection bump) [1]. Параллельно мы рассматриваем современные методы инъекции с нелинейным магнитом-кикером, при которых накопленный пучок остается на оси промежутка [2].

В момент инъекции с помощью четырех импульсных магнитов (кикеров) с длительностью импульса поля  $3.2 \mu\text{s}$  (или два оборота), расположенных симметрично относительно середины промежутка, создается локальное искажение замкнутой орбиты в горизонтальной плоскости с амплитудой 7.5 мм, подводящий циркулирующий пучок к ножу септум-магнита Ламбертсона (см. **Рисунок 2.8.2**). Два кикер-магнита расположены по краям прямолинейного промежутка (показаны на **Рисунке 2.8.1**), еще два кикер-магнита – внутри секций согласования рядом с квадрупольной линзой. На **Рисунке 2.8.2** показаны нож магнита Ламбертсона, четыре кикера и создаваемый ими локальный вынос орбиты накопленного пучка.

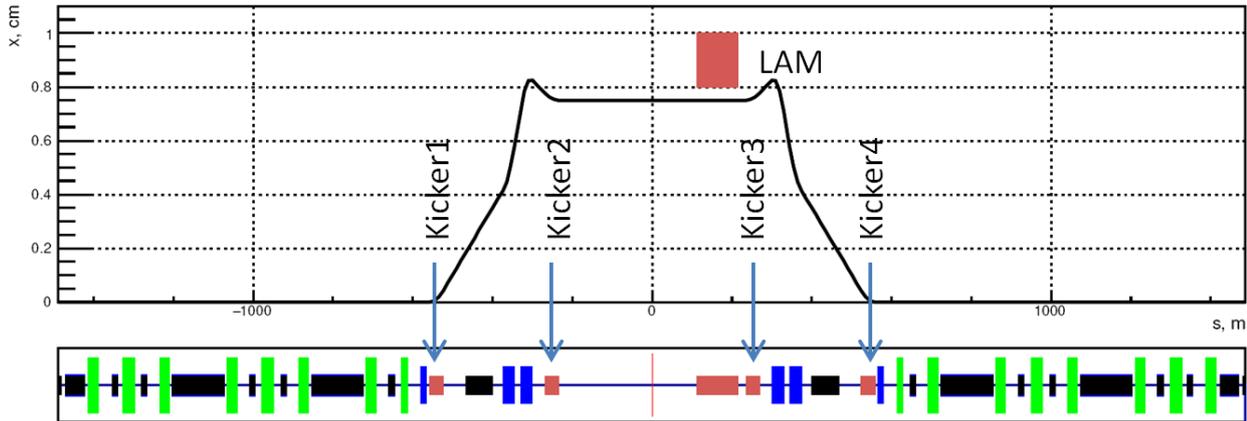


Рисунок 2.8.2. Горизонтальное искажение замкнутой орбиты на впуске.

Впускаемый пучок подводится к точке инжекции снизу с помощью дипольного магнита DIP4 (Рисунок 2.8.1) и постоянного септум-магнита DC-SEP, на выходе из которого выпускаемый пучок по горизонтали параллелен циркулирующему со смещением 13 мм относительно оси промежутка впуска, а по вертикали имеет угол 5 мрад и смещение 45 мм. Затем магнит-«ламбертсон» поворачивает выпускаемый пучок по вертикали и выводит его в медианную плоскость кольца, на расстоянии 13 мм от равновесной орбиты параллельно циркулирующему пучку. Далее оба пучка движутся в единой вакуумной камере с увеличенной апертурой Ø35 мм (напомним, что «регулярная» апертура вакуумной камеры накопителя Ø27 мм) и попадают в третий кикер, который, совместно с четвертым кикером, возвращает накопленный пучок на равновесную орбиту. Впущенный пучок при этом совершает бетатронные колебания около равновесной орбиты, затухающие из-за радиационного трения.

Характерные расстояния, соответствующие моменту инжекции показаны на Рисунок 2.8.3.

$$\sigma_{xstor} = 32.3 \mu\text{m}$$

$$3\sigma_{xstor} = 0.1 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xinj} = 0.77 \text{ mm}$$

$$3\sigma_{xinj} = 2.3 \text{ mm}$$

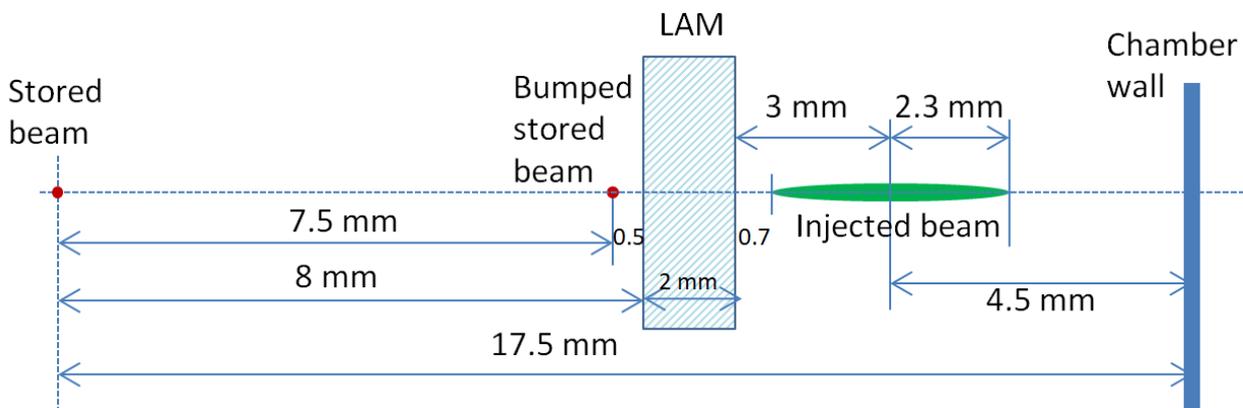


Рисунок 2.8.3. Схематичное положение пучков в момент инжекции.

В Таблице 2.8.1 показаны основные параметры выпускаемого и накопленного пучков. При этом предполагается, что оптические функции канала транспортировки ТК2 согласованы

с оптическими функциями накопителя. Размеры и разбросы пучков даются в смысле средне-квадратичного значения. Используются только основные резонаторы, искусственного удлинения пучка нет.

Параметры магнитов-кикеров приведены в **Таблице 2.8.2**.

**Таблица 2.8.1.** Параметры впускаемого и накопленного пучков.

Пучок	Накопленный	Впускаемый
Коэфф.бетатронной связи, %	10	
Бета-функции (гор/вер), м	15.6/2.4	
Дисперсионная функция, м	0	
Полный эмиттанс, пм	73.2	41300
Эмиттанс пучка (гор/вер), пм	66.5/6.65	37500/3750
Энергетический разброс $\times 10^{-3}$	1	0.8
Длина сгустка	6.3	16
Гор/вер размер пучка, $\mu\text{м}$	32.2/4	767/95.5
Угловой разброс (гор/вер) $\times 10^{-6}$	2.1/1.7	49/40
Расстояние до оси накопителя, мм	7.5	13÷14

**Таблица 2.8.2.** Параметры импульсных магнитов-кикеров.

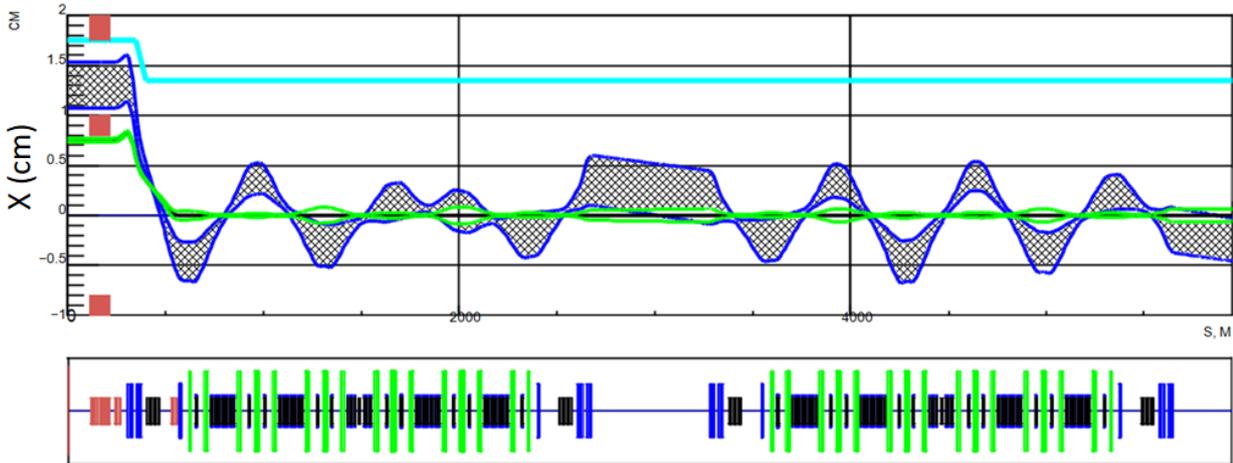
№ кикера	1	2	3	4
Длина, см	35	35	35	35
Угол поворота, мрад	2.48	1.58	1.58	2.48
Амплитуда поля, Гс	710	450	450	710
Апертура, $\varnothing$ мм	27	35	35	27

Для оценки эффективности инъекции было проведено численное моделирование, в том числе, с возможными ошибками параметров впускаемого пучка (нацеливания, смещения по координате, отклонения по импульсу) и с неточностями выставки магнитных элементов.

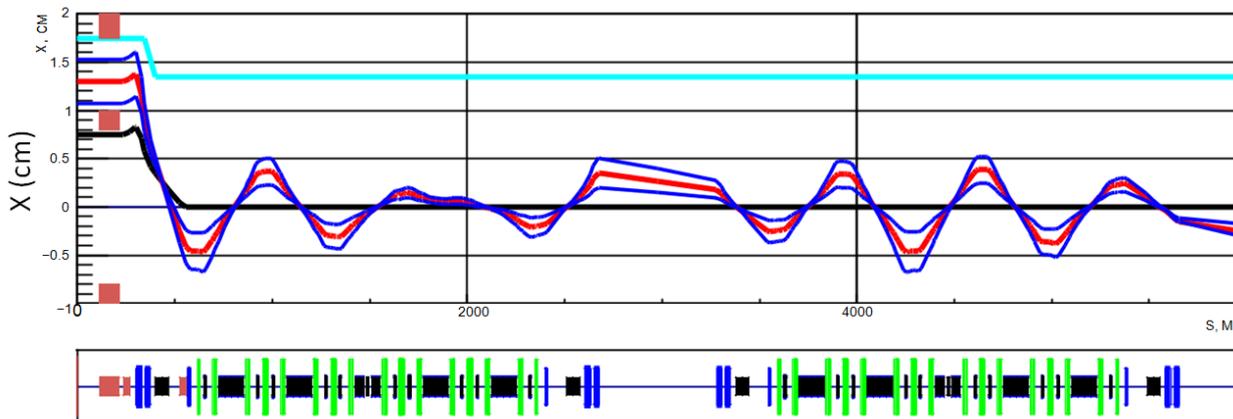
На **Рисунке 2.8.4** показана эволюция впущенного в накопитель пучка (огибающая на уровне  $\Delta x_{inj} = \pm 3\sigma_{xinj}$ ) на протяжении двух ближайших суперпериодов. Для сравнения здесь же приведена огибающая накопленного пучка  $\Delta x_{st} = \pm 6\sigma_{xst}$ , но ввиду малого эмиттанса в таком масштабе положительная и отрицательная кривые плохо различимы. Моделирование на **Рисунке 2.8.4** выполнено для идеально согласованного пучка и в отсутствии ошибок.

Следующим шагом мы исследовали процесс инъекции для пучка, который на выходе из канала ТК2 имеет смещение по горизонтальной координате, либо отклонение по углу, либо энергию, отличающуюся от равновесной энергии накопителя. Результаты показаны на **Рисунках 2.8.5 – 2.8.7**.

На **Рисунке 2.8.5** приведены центральные траектории пучка, инжектируемого с отклонением по горизонтали от расчетного положения на  $\Delta x_{inj} = \pm 2.3 \text{ мм} = \pm 3\sigma_{xinj}$ . Здесь же для сравнения приведены и «идеальные» траектории.



**Рисунок 2.8.4.** Огибающая впущенного пучка (синие линии, заштриховано) и огибающая циркулирующего пучка (зеленые линии) для согласованной инжекции.



**Рисунок 2.8.5.** Центральные траектории впускаемого (красный) и накопленного (черный) пучков при «идеальной» инжекции. Синим цветом показаны центральные траектории впускаемого пучка, отклоненного по горизонтали на  $\Delta x_{inj} = \pm 2.3 \text{ мм} = \pm 3\sigma_{xinj}$ .

**Рисунок 2.8.6** показывает случай ошибки нацеливания впускаемого пучка по углу на величину  $\Delta x'_{inj} = \pm 150 \text{ мкрад} = \pm 3\sigma'_{xinj}$ . **Рисунок 2.8.7** – отклонение энергии инжектируемых частиц  $\Delta E/E_{0inj} = \pm 0.24\% = \pm 6\sigma_{Einj}$ , где  $\sigma_{Einj}$  – относительный энергетический разброс впускаемого пучка, указанный в **Таблице 2.8.1**. Как и на **Рисунке 2.8.5**, показаны центральные траектории, соответствующие пучку с отклоненными параметрами.

Для изучения эффективности инжекции в накопитель в зависимости от апертурных ограничений было проведено моделирование поведения ансамбля частиц в течение некоторого числа оборотов. Учитывались физическая апертура (**Рисунок 2.8.3**), шестимерная динамическая апертура (включен стандартный набор секступолей, компенсирующих хроматизм), синхротронные колебания (без удлинения пучка). Не учитывались радиационное затухание и коллективные эффекты.

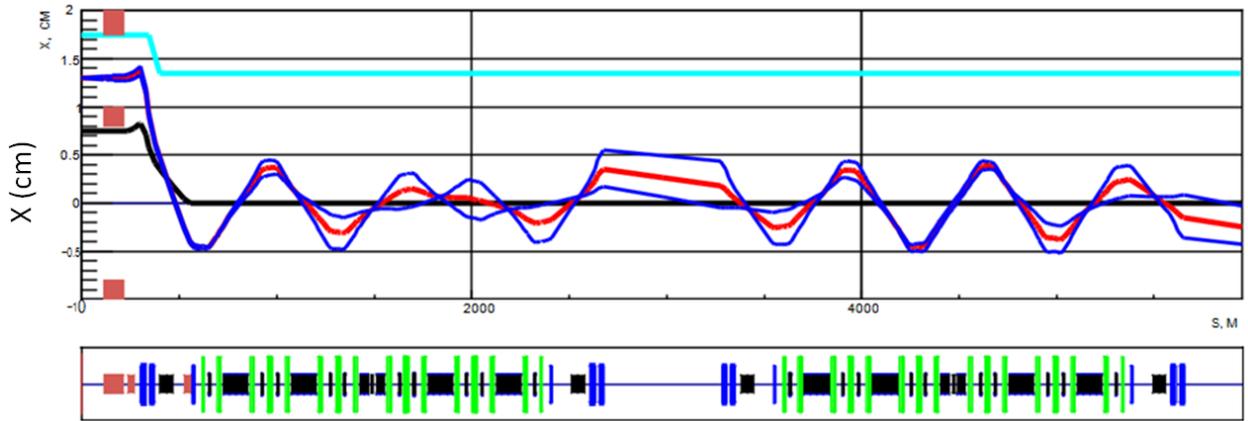


Рисунок 2.8.6. Впускаемый пучок имеет отклонение по углу  $\Delta x'_{inj} = \pm 150 \mu\text{рад} = \pm 3\sigma'_{inj}$ .

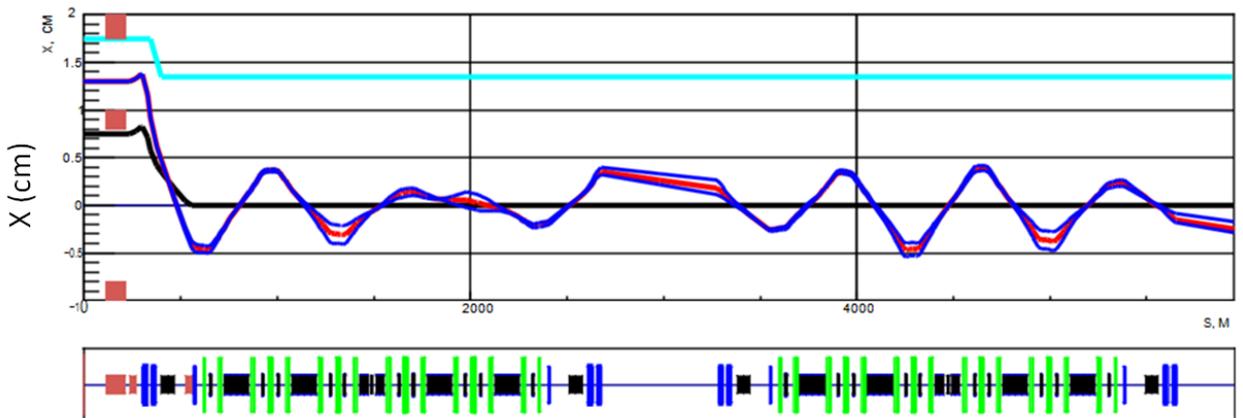
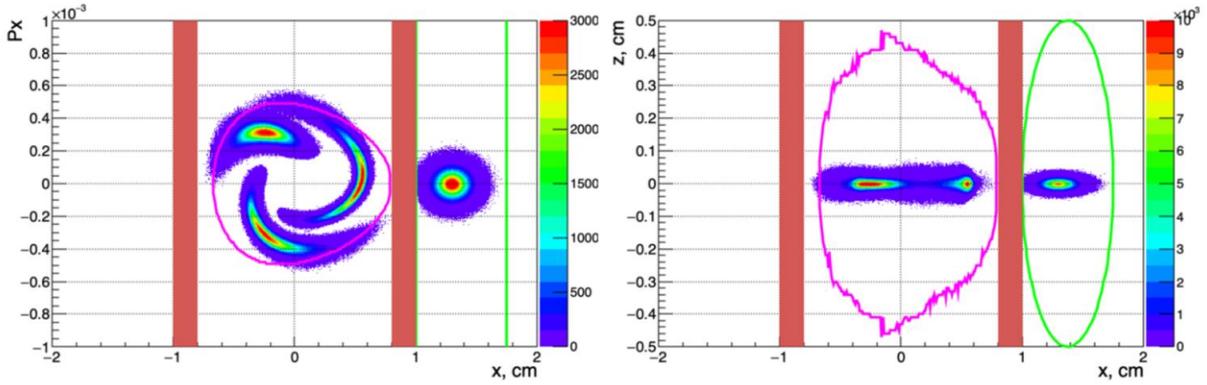


Рисунок 2.8.7. Впускаемый пучок имеет ошибку энергии  $\Delta E/E_{0inj} = \pm 0.24\% = \pm 6\sigma_{Einj}$ .

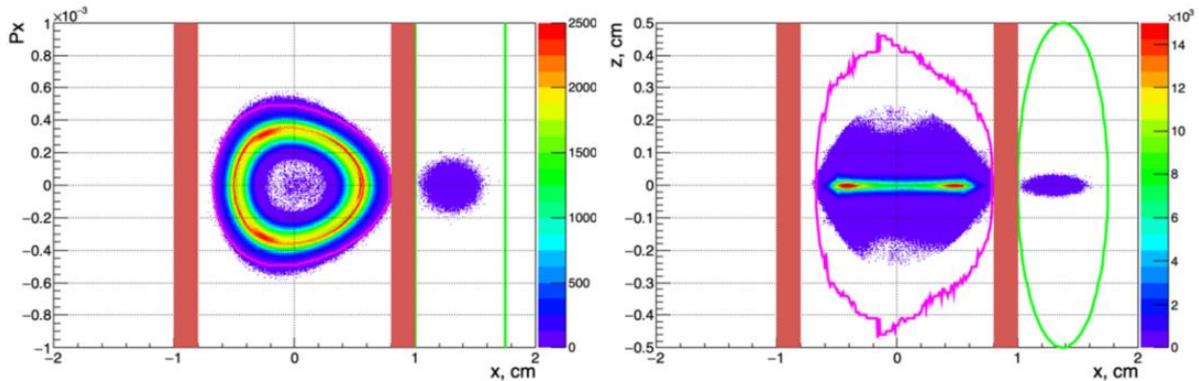
На **Рисунке 2.8.8** показано поведение впущенного пучка в течение трех первых оборотов. Вертикальные красные полосы показывают нож и ярмо септум-магнита. Исходное распределение частиц на впуске в накопитель нормальное с параметрами, заданными в **Таблице 2.8.1**. Результаты моделирования показывают, что при заданных апертурных ограничениях и параметрах впускаемого пучка потери инжекции составляют малую величину 0.009%, причем 59% частиц теряется при впуске, а 41% во время первого оборота.

На **Рисунке 2.8.9** эволюция пучка ( $10^5$  частиц) прослеживается на протяжении 1000 оборотов. Полные потери пучка – 0.4%, из них 0.7% при влете в септум-ламбертсон, 1.7% – в течение первого оборота, остальные (97.6%) – после третьего оборота.

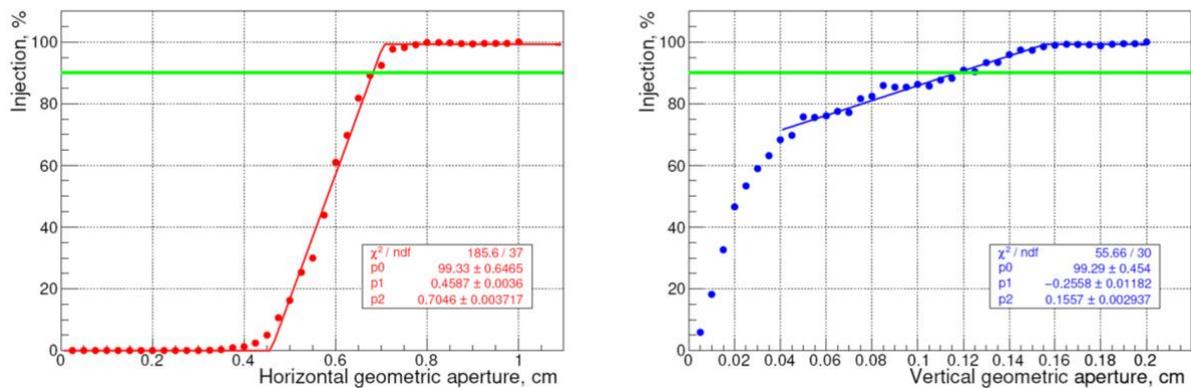
Расчет эффективности захвата части в зависимости от ограничения геометрической апертуры во всех прямолинейных промежутках накопителя показан на **Рисунке 2.8.10**. Предполагается, что именно в прямолинейном промежутке будет происходить основное ограничение апертуры – по вертикали из-за вакуумных камер вставных устройств и по горизонтали из-за элементов системы инжекции. Видно, что апертуры  $\Delta x \approx \pm 7$  мм и  $\Delta y \approx \pm 1.2$  мм достаточно, чтобы обеспечить эффективность инжекции  $>90\%$ .



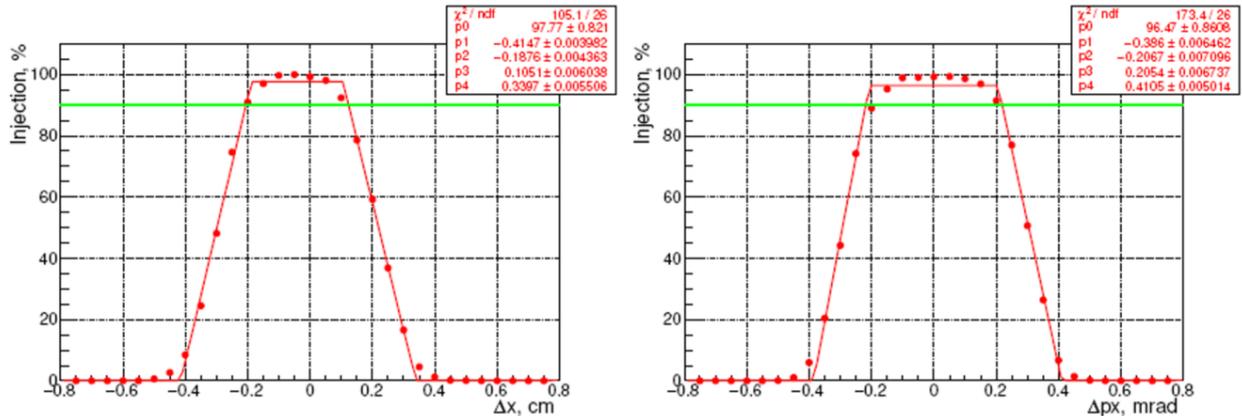
**Рисунок 2.8.8.** Горизонтальная фазовая плоскость (слева) и поперечное сечение на азимуте септумламбертсона. Показаны впускаемый пучок на выходе из канала и три последовательных оборота впущенного пучка в накопителе. Статистика –  $10^7$  частиц. Размеры вакуумной камеры канала (зеленый эллипс на правом рисунке)  $\Delta x \times \Delta y = 7.5 \times 10 \text{ мм}^2$ . Розовая линия показывает границы динамической апертуры.



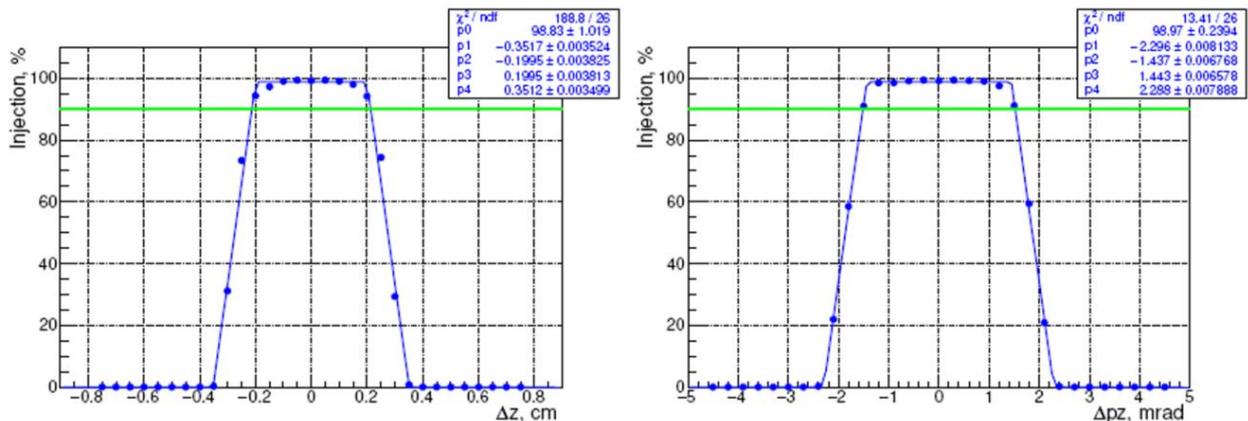
**Рисунок 2.8.9.** То же, что на рис.2.8.8, но для 1000 оборотов.



**Рисунок 2.8.10.** Зависимость эффективности инжекции от ограничения горизонтальной (слева) и вертикальной геометрических апертур в центре прямолинейного промежутка ( $10^3$  частиц, 1000 оборотов).



**Рисунок 2.8.11.** Зависимость эффективности инъекции от ошибки нацеливания пучка на впуске по горизонтали (слева – по координате, справа – по углу).  $10^3$  частиц, 1000 оборотов. Здесь и ниже зеленая линия показывает эффективность инъекции 90 %.

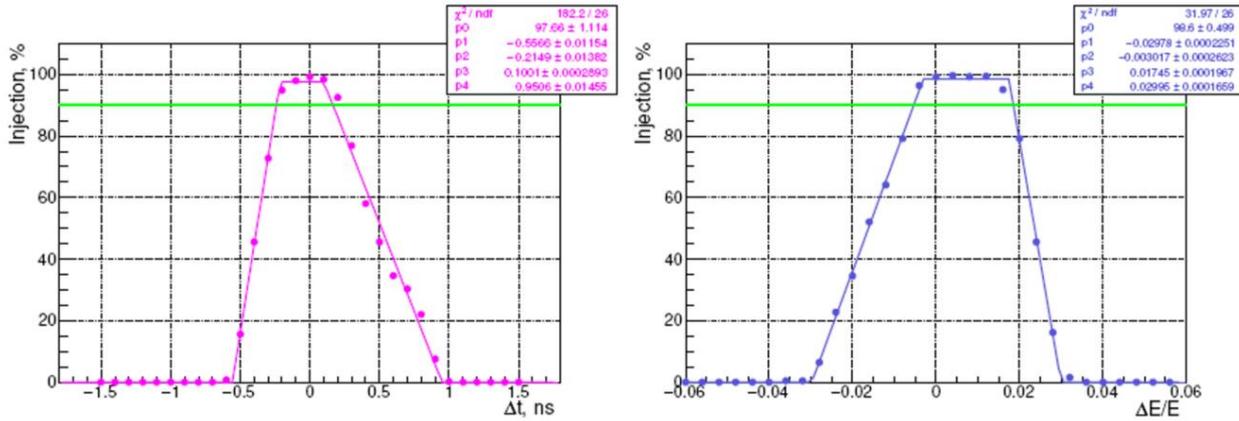


**Рисунок 2.8.12.** Зависимость эффективности инъекции от ошибки нацеливания пучка на впуске по вертикали (слева – по координате, справа – по углу).  $10^3$  частиц, 1000 оборотов.

На **Рисунках 2.8.11 и 2.8.12** приведены результаты моделирования процесса инъекции с учетом возможной ошибки нацеливания пучка на влете в накопитель из канала перепуска. Графики демонстрируют допустимые отклонения начальных условий влета пучка как по координате, так и по углу нацеливания. На **Рисунке 2.8.13** показано, к чему приводят ошибка синхронизации влета пучка в накопитель (левый график) и отклонение средней энергии пучка от номинальной. Результаты моделирования суммированы в **Таблице 2.8.3**.

**Таблица 2.8.3.** Требования к стабильности параметров впускаемого пучка для получения 90 % эффективности инъекции

Горизонтальная координата $\Delta x$ , мм	-2.1 ... +1.2
Горизонтальный угол $\Delta x'$ , мрад	-2.1 ... +1.2
Вертикальная координата $\Delta y$ , мм	-2.2 ... +2.2
Вертикальный угол $\Delta y'$ , мрад	-1.5 ... +1.5
Время влета пучка $\Delta t$ , нс	-0.24 ... +0.17
Отн.отличие средней энергии $\Delta E/E$ , %	-0.54 ... +1.9



**Рисунок 2.8.13.** Зависимость эффективности инжекции от ошибки времени влета пучка (слева) и отклонения средней энергии пучка (справа).  $10^3$  частиц, 1000 оборотов.

**Таблица 2.8.4.** Требования на точность выставки элементов канала

		Диполи	Квадруполи
X	мм	0.2	0.3
Y	мм	0.2	0.3
S	мм	0.5	1
$\alpha_x$	мрад	1	1
$\alpha_y$	мрад	1	1
$\alpha_s$	мрад	1	1

С помощью MADX были проведены вычисления влияния ошибок выставки дипольных магнитов и квадрупольных линз канала от бустера до накопителя. Ошибки вносились случайным образом как в координаты выставки (X, Y, S), так и в соответствующие углы ( $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_s$ ). Здесь X, Y, S – горизонтальная, вертикальная и продольная координаты. Распределение ошибок нормальное, обрезанное на уровне трех среднеквадратичных отклонений. Результат сравнивался с требованиями на стабильность траектории впускаемого пучка (Таблица 2.8.3). Значения допустимых погрешностей на выставку элементов канала основе выборки из 1000 вычислений представлены в Таблице 2.8.4.

## Список цитируемой литературы

- [1] А.А.Старостенко, П.В.Логачев, О.И.Мешков и др. Статус и перспективы инжекционного комплекса ИЯФ, Письма в ЭЧАЯ, 2016, т.13, №7(205), с.1493-1499.
- [2] S.Gurov, S.Karnaev, V.Kiselev, E.Levichev, V.Smaluk, S.Sinyatkin, A.Zhuravlev. Commissioning of NSLS-II Booster, Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Part. Acc. Conf. IPAC2014, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRO088, 295-297.
- [3] N.A. Mezentsev et al. Superconducting Multipole Wigglers: State of the Art. Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Part. Acc. Conf. IPAC2014, doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-WEPRI091, 4103-4106.
- [4] R. Nagaoka and A.F.Wrulich, Emittance minimisation with longitudinal dipole field variation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A **575**, 292 (2007).

- [5] B. Riemann and A. Streun, Low emittance lattice design from first principles: reverse bending and longitudinal gradient bends, <https://arxiv.org/pdf/1810.11286.pdf>, arxiv:1810.11286, 26 Oct 2018.
- [6] L. C. Teng, Fermilab Report No. TM-1269, 1984.
- [7] S.Y. Lee and L. C. Teng, in Proceedings of the 1991 Particle Accelerator Conference, San Francisco, CA, 1991 (IEEE, New York, 1991), p.2679.
- [8] S.Y. Lee, Phys. Rev. E 54, 1940 (1996).
- [9] D. Einfeld, J. Schaper, and M. Plesco, J. Phys IV (France) 04, C9-373 (1994).
- [10] C.X. Wang, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 061001 (2009).
- [11] Yi Jiao, Yunhai Cai, and A.W. Chao, Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 054002 (2011).
- [12] The MAD-X Program V 5.05.02. User's Reference Manual, Geneva, Switzerland, July 25, 2019.
- [13] A. Terebilo, Accelerator modeling with MATLAB Accelerator Toolbox, Particle Accelerators Conference 2001, p.3203.
- [14] П.А. Пиминов. Численное моделирование и оптимизация параметров нелинейного движения в циклическом ускорителе. Дисс. к.ф.-м.н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2010.
- [15] J. Laskar, Astronomy and astrophysics, **198**, 341-362 (1988)
- [16] R.H. Helm R H et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **20** 900 (1973)
- [17] В.В. Смалюк. «Обзор коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях». Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2012, том 43, выпуск 2.
- [18] Н.С. Диканский, Д.В. Пестриков. «Физика интенсивных пучков в накопителях». Новосибирск, Наука, 1989.
- [19] С.С. Куреной. «Взаимодействие пучка с вакуумной камерой ускорителя. Методы вычисления импеданса связи». Физика элементарных частиц и атомного ядра, том 24, выпуск 3, 1993.
- [20] В.В. Смалюк. «Подавление коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях», диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Новосибирск, 2010.
- [21] G. Stupakov. Resistive Wall Impedance of an Insert, SLAC-PUB-11052, 2005.

## Основные системы накопителя

А.В. Акимов<sup>1</sup>, Ю.С. Актершев<sup>1</sup>, В.В. Анашин<sup>1</sup>, А.В. Андрианов<sup>1</sup>, О.В. Анчугов<sup>1</sup>,  
М.В. Арсентьева, П.А. Бак<sup>1</sup>, Г.Н. Баранов<sup>1,2</sup>, А.М. Барняков<sup>1</sup>, А.М. Батраков<sup>1</sup>, О.В. Беликов<sup>1</sup>,  
Л.Л. Белова<sup>1</sup>, Е.А. Бехтенов<sup>1</sup>, В.И. Бухтияров<sup>3</sup>, А.В. Богомятков<sup>1,2</sup>, В.М. Борин<sup>1</sup>,  
Д.Б. Буренков<sup>1,2</sup>, Д.С. Винник<sup>1</sup>, В.Н. Волков<sup>1</sup>, Е.С. Вонда<sup>1</sup>, К.М. Горчаков<sup>1</sup>, К.А. Гришина<sup>1</sup>,  
Д.С. Гуров<sup>1</sup>, С.М. Гуров<sup>1</sup>, Г.А. Гусев<sup>1</sup>, Б.А. Довженко<sup>1</sup>, В.Л. Дорохов<sup>1,2</sup>, Е.Н. Дементьев<sup>1</sup>,  
А.И. Ерохин<sup>1</sup>, А.А. Жариков<sup>1</sup>, К.В. Жилиев<sup>1</sup>, А.А. Жуков<sup>1</sup>, А.Н. Журавлев<sup>1,2</sup>,  
К.В. Золотарев<sup>1,2</sup>, Н.А. Золотухина<sup>1</sup>, Я.В. Зубавичус<sup>2,3</sup>, С.Е. Карнаев<sup>1</sup>, Г.В. Карпов<sup>1</sup>,  
К.Ю. Карюкина<sup>1,2</sup>, В.Д. Кашкин<sup>1</sup>, В.А. Киселев<sup>1</sup>, В.В. Кобец<sup>1</sup>, Е.С. Котов<sup>1</sup>, В.Я. Корчагин<sup>1</sup>,  
А.А. Краснов<sup>1,2</sup>, В.С. Крапивин<sup>1</sup>, С.А. Крутихин<sup>1</sup>, В.С. Кузьминых<sup>1</sup>, Г.Н. Кулипанов<sup>1,2</sup>,  
И.В. Купцов<sup>1</sup>, Г.Я. Куркин<sup>1</sup>, А.Е. Левичев<sup>1,2</sup>, Е.Б. Левичев<sup>1,2</sup>, Д.В. Лешонок (Дорохова)<sup>1,2</sup>,  
П.В. Логачев<sup>1</sup>, Ю.И. Мальцева<sup>1</sup>, Ма Сяо Чао<sup>1</sup>, Н.А. Мезенцев<sup>1,2</sup>, О.И. Мешков<sup>1</sup>,  
Н.В. Митянина<sup>1</sup>, И.А. Морозов<sup>1,2</sup>, А.А. Морсин<sup>1</sup>, С.А. Никитин<sup>1</sup>, Д.А. Никифоров<sup>1</sup>,  
В.К. Овчар<sup>1</sup>, И.Н. Окунев<sup>1,2</sup>, А.В. Павленко<sup>1</sup>, О.А. Павлов<sup>1</sup>, А.Ю. Пахомов<sup>1</sup>, В.М. Петров<sup>1</sup>,  
С.Л. Пивоваров<sup>1</sup>, П.А. Пиминов<sup>1,2</sup>, А.В. Полянский<sup>1</sup>, Д.Н. Пурескин<sup>1</sup>, Д.Ф. Решетов<sup>1</sup>,  
В.В. Репков<sup>1</sup>, Е.А. Ротов<sup>1</sup>, Т.В. Рыбицкая<sup>1</sup>, С.Л. Самойлов<sup>1,2</sup>, И.К. Седяров<sup>1</sup>, А.М. Семенов<sup>1</sup>,  
Д.В. Сеньков<sup>1</sup>, Л.Е. Сердаков<sup>1</sup>, Ш.Р. Сигнатулин<sup>1</sup>, С.В. Синяткин<sup>1,2</sup>, М.А. Скамароха<sup>1,2</sup>,  
А.А. Старостенко<sup>1</sup>, А.Г. Трибендис<sup>1,2</sup>, А.В. Уткин<sup>1</sup>, М.Г. Федотов<sup>1</sup>, А.С. Цыганов<sup>1</sup>,  
А.Д. Чернякин<sup>1</sup>, И.Н. Чуркин<sup>1,2</sup>, С.В. Шиянков<sup>1</sup>, Д.А. Шведов<sup>1</sup>, В.А. Шкаруба<sup>1,2</sup>,  
К.С. Штро<sup>1</sup>, Н.С. Щегольков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, д. 11, 630090, г. Новосибирск

<sup>2</sup> ЦКП "СКИФ", Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Никольский пр., 1, 630559, Кольцово

<sup>3</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090

Автор для переписки: [levichev@srf-skif.ru](mailto:levichev@srf-skif.ru)

Аннотация. В данном разделе приведено описание основных систем ЦКП «СКИФ»: магнитной системы, вакуумной системы, ускоряющих резонаторов, усилителей мощности системы ВЧ питания резонаторов, источников питания магнитов, системы управления ускорительным комплексом, системы диагностики пучка, а также геодезического обеспечения.

Ключевые слова: магнитные элементы, источники питания, вакуумная система, ускоряющие резонаторы, системы управления, диагностика пучка.

## Оглавление

3.1	Магнитная система.....	183
3.1.1	Общее описание магнитной системы.....	183
3.1.2	Дипольные магниты.....	184
3.1.2.1	Дипольный магнит ВМА.....	185
3.1.2.2	Дипольный магнит ВДС.....	189
3.1.2.3	Дипольный магнит ВРС.....	191
3.1.3	Квадрупольные магниты.....	195
3.1.3.1	Квадрупольные линзы QFB, QFA и QDA.....	197
3.1.3.2	Квадрупольные линзы AFA, AFC.....	199
3.1.4	Секступольные магниты.....	201
3.1.5	Индивидуально расположенные корректоры.....	207
3.2	Вакуумная система.....	208
3.2.1	Вакуумная система линейного ускорителя.....	208
3.2.2	Вакуумная система бустерного синхротрона.....	210
3.2.3	Вакуумная система накопителя.....	218
3.3	Ускоряющие резонаторы.....	231
3.4	Усилители мощности системы ВЧ питания резонаторов.....	241
3.4.1	СВ усилители мощности на частоту 357 МГц.....	242
3.4.1.1	Блок предварительного усилителя.....	246
3.4.1.2	Блок усилителя мощности.....	246
3.4.1.3	Блок управления.....	247
3.4.1.4	Блок дистанционного контроля.....	248
3.4.1.5	Усилители для резонаторов бустера.....	248
3.4.2	СВ усилители мощности на частоту 1071 МГц.....	249
3.4.2.1	Блок предварительного усилителя.....	253
3.4.2.2	Блок усилителя мощности.....	255
3.4.2.3	Блок управления.....	256
3.4.2.4	Блок дистанционного контроля.....	256
3.4.3	Импульсный усилитель мощности на частоту 178 МГц.....	257
3.4.3.1	Блок предварительного усилителя.....	262
3.4.3.2	Блок усилителя мощности.....	263
3.4.3.3	Блок управления.....	263
3.4.3.4	Блок дистанционного контроля.....	264
3.4.4	Импульсный усилитель мощности на частоту 534 МГц.....	265
3.4.4.1	Блок усилителя мощности.....	267

3.4.4.2	Блок управления.....	268
3.4.4.3	Блок дистанционного контроля.....	268
3.5	Источники питания магнитов.....	269
3.5.1	Источники питания систем линейного ускорителя.....	269
3.5.1.1	MPS-300-24.....	269
3.5.1.2	MPS-150-24.....	271
3.5.1.3	MPS-20-50.....	272
3.5.1.4	MPS-6-24.....	276
3.5.2	Источники питания магнитов транспортного канала от линака к бустеру.....	281
3.5.3	Источники питания электромагнитов бустера.....	281
3.5.3.1	Источники питания дипольных магнитов бустера.....	284
3.5.3.2	Источники питания квадрупольных линз бустера.....	285
3.5.3.3	Источники питания секступолей и дипольных корректоров.....	287
3.5.4	Источники питания магнитов транспортного канала от бустера к накопителю.....	293
3.5.5	Источники питания электромагнитов основного кольца.....	294
3.5.5.1	Источники питания дипольных магнитов.....	294
3.5.5.2	Источники питания квадрупольных линз и секступолей.....	301
3.5.5.3	Источники питания отдельно стоящих корректоров.....	301
3.6	Система управления.....	303
3.6.1	Структура и состав системы управления.....	305
3.6.2	Структура сети СУ.....	307
3.6.3	Синхронизация СУ.....	309
3.6.4	Сценарии управления.....	316
3.6.5	Управляемые устройства.....	320
3.6.6	Управление источниками питания.....	322
3.6.7	Управление высокочастотной ускоряющей системой.....	326
3.6.8	Управление оборудованием диагностики пучка.....	327
3.6.9	Системы обратной связи.....	329
3.6.10	Управление вакуумной системой.....	331
3.6.11	Управление сигналами блокировок.....	332
3.6.12	Программное обеспечение.....	333
3.7	Система диагностики пучка.....	337
3.7.1	Системы измерения положения пучка.....	338
3.7.2	Оптическая диагностика пучка.....	351
3.7.3	Люминофоры для измерения параметров пучка.....	358
3.8	Геодезическое обеспечение.....	364
	Список цитируемой литературы.....	371

## 3.1 Магнитная система

Магнитная система накопителя электронов ЦКП «СКИФ» выполняет многочисленные и важные функции такие, как получение малого эмиттанса, компенсация натурального хроматизма, коррекция замкнутой орбиты и линейной бетатронной связи, настройка различных режимов, компенсация влияния вставных устройств и т.д. Характерными чертами магнитной системы источника СИ четвертого поколения являются большие градиенты квадрупольных и секступольных линз, использование магнитов с совмещенными функциями (например, наличие градиента в дипольном магните), плотная «упаковка» магнитных элементов в продольном направлении. Большие градиенты приводят к малым апертурам, а поскольку требования к качеству магнитного поля высоки, соответственно увеличивается точность изготовления магнитов и их взаимного позиционирования.

### 3.1.1 Общее описание магнитной системы

В данной главе описываются магнитные элементы, соответствующие базовой оптической структуре накопителя, показанной на **Рисунке 2.1.3.3**, с параметрами пучка, приведенными в **Таблице 2.1.3.1**. Основные характеристики магнитов СКИФ суммированы в **Таблице 3.1.1.1**.

Напомним, что для оптимизации поведения оптических функций и получения малого эмиттанса приходится применять магниты с совмещенными функциями. Так, в дипольных магнитах присутствует поперечный градиент, а в квадрупольных линзах – дипольная компонента, получаемая горизонтальным смещением линзы относительно оси пучка. Однако, для уменьшения времени реализации проекта мы стремились избегать использования слишком сложных магнитов, требующих долговременных расчетов, оптимизации, изготовления и исследования прототипов и т.п. Так, поперечный градиент в поворотных магнитах не очень большой, аналогичный градиенту в поворотных магнитах бустерного синхротрона. Мы не используем магнитов с продольной вариацией поля, октупольных магнитов для оптимизации динамической апертуры и т.п.

Поскольку вставные устройства (особенно, сильнополевые вигглеры) могут приводить к искажению орбиты пучка и возмущению оптических функций накопителя, они, как правило, устанавливаются вместе с дополнительными корректирующими магнитами (дипольными, квадрупольными и т.д.), призванными компенсировать влияние вставных устройств. Эти магнитные элементы не описываются в данной главе, поскольку их свойства и конструкция зависят от конкретных вставных устройств, чьи параметры (например, для станций второй очереди) еще не определены с хорошей точностью.

В целом подход заключается в том, чтобы рассматривать вновь устанавливаемое «вставное устройство» с еще неизвестными характеристиками, не просто, как набор магнитов для генерации СИ, но как систему, включающую собственно вигглер или ондулятор, корректирующие магниты, вакуумную камеру, дополнительную диагностику пучка (если требуется) и т.д.

**Таблица 3.1.1.1.** Основные параметры магнитных элементов накопителя СКИФ для базовой структуры.

Дипольные магниты								
Тип/число	L, м	$\theta^\circ$	$\rho$ , м	B, Т	$K_1$ , м <sup>-2</sup>	G, Т/м	$K_2$ , м <sup>-3</sup>	S, Т/м <sup>2</sup>
BD1/64	1.3	4.12	18.07	0.553	-0.791	-7.91	-	-
BD2/32	0.47	1.245	21.62	0.526	-1.074	-10.74	-	-
BM/32	0.69	2.079	19.01	0.526	-	-	-	-
BP/16	0.148	1.74	4.87	2.05	-	-	-	-
Квадрупольные магниты								
QD/32	0.3	-	-	-	-4.456	-44.56	-	-
QF1/32	0.3	-	-	-	4.397	43.97	-	-
QF2/32	0.15	-	-	-	4.866	48.66	-	-
QF3/128	0.15	-0.221	-38.84	-0.257	5.152	51.52	-	-
QF4/32	0.15	-0.3	-28.66	-0.349	4.987	49.87	-	-
Секступольные магниты								
SF1/32	0.15	-	-	-	-	-	231.309	2313.09
SD/160	0.25	-	-	-	-	-	-237.939	-2379.39
SF2/64	0.3	-	-	-	-	-	231.309	2313.09

### 3.1.2 Дипольные магниты

Дипольные магниты формируют замкнутую орбиту пучка. Два типа диполей (BDA и BSA) содержат поперечный градиент поля и участвуют в фокусировке пучка. Дипольные магниты и их параметры перечислены в **Таблице 3.1.2.1**.

**Таблица 3.1.2.1.** Дипольные магниты и их основные характеристики.

Магнит	$L_m$ , м	h, мм	B, Т	G, Т/м	Кол-во
BMA	0.69	15	0.5262	0	32
BDA	1.3	15	0.553	-7.919	64
BDC	0.47	15	0.4627	-10.748	32
BPC	0.21	15	2.05	0	16
				Всего	144

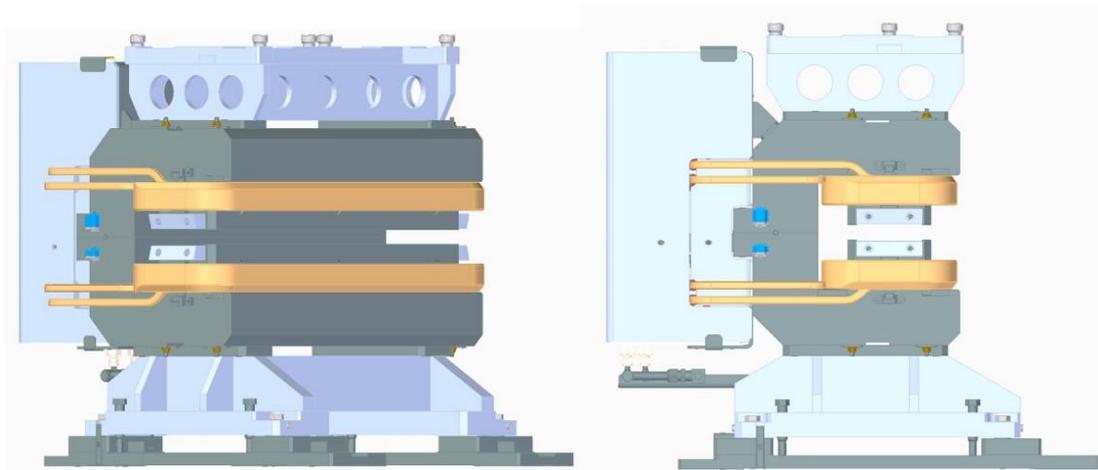
В таблице  $L_m$  – эффективная (магнитная) длина области поля, h – половинный межполюсной зазор в точке прохождения орбиты пучка, B и G – номинальные поле и градиент магнита.

Дипольные магниты (кроме BPC) являются электромагнитами с ярмом, изготовленным из магнитомягкого железа, и медными токовыми обмотками. Магнит BPC, чья функция – генерация потока жестких фотонов (поле в зазоре магнита 2 Т), выполнен на основе постоянных магнитов NdFeB с токовой корректирующей обмоткой. Ярмо магнитов изготавливается сплошным или ламинированным из электротехнической стали. Поскольку источник СИ СКИФ работает с постоянной энергией пучка, способ изготовления ярма зависит только от технологического удобства.

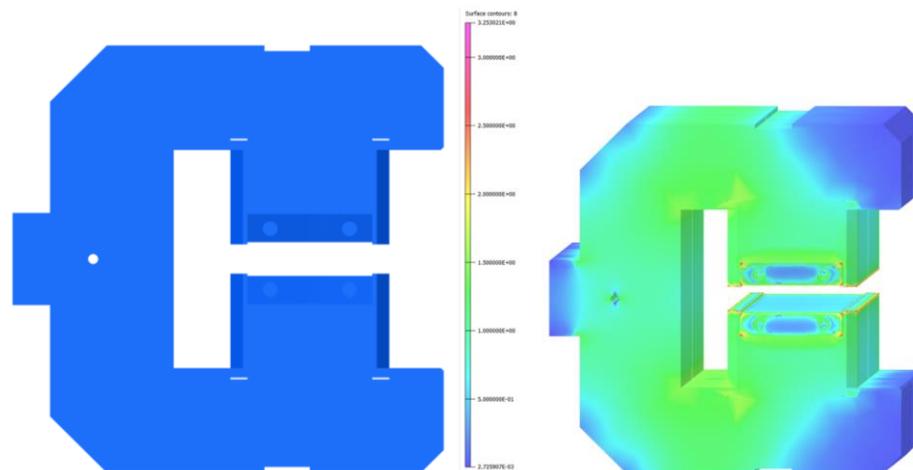
Ниже кратко описываются основные свойства и характеристики дипольных магнитов СКИФ.

### 3.1.2.1 Дипольный магнит ВМА

Размещается на краях суперпериода в секциях зануления дисперсионной функции в прямолинейном промежутке. **Рисунок 3.1.2.1** показывает внешний вид диполя, **Рисунок 3.1.2.2** – магнитопровод с торца и распределение потока индукции в ярме. Диполь ВМА имеет С-образную конфигурацию для пропускания каналов вывода СИ, магнитопровод изготавливается из сплошного железа.



**Рисунок 3.1.2.1.** Трехмерная модель диполя ВМА. На торцах видны накладки для регулировки магнитной длины и качества интеграла магнитного поля.



**Рисунок 3.1.2.2.** Слева – вид с торца на магнитопровод диполя ВМА. Справа цветом показано насыщение ярма (на концах полюсов хорошо видны выравнивающие накладки).

На торцах диполя с обеих сторон на верхнем и нижнем полюсах крепится выдвижная (на 2 мм) накладкой высотой 25 мм, имеющая две фаски под различными углами для выравнивания интегрального качества магнитного поля.

Кроме основной обмотки на полюсе размещается слабая (1% от основного поля) корректирующая обмотка.

Основные спецификации дипольного магнита ВМА приведены в **Таблице 3.1.2.2.**

Расчетные величины интегральных гармоник поля на радиусе 10 мм (поле соответствующей гармоники, отнесенное к основному полю В<sub>1</sub>) приведено в **Таблице 3.1.2.3.**

**Таблица 3.1.2.2.** Основные спецификации магнита ВМА

Магнитная длина $L_m$ , м	0.69
Межполюсный зазор на орбите $2h$ , мм	30
Внутренний радиус вак.камеры $R_{vin}$ , мм	13.5
Интеграл магнитного поля, $I_B$ , Т·мм	363.092
Номинальное поле на орбите $B_1$ , Т	0.5262
Номинальный градиент на орбите $G_0$ , Т/м	0
Инт.однородность поля $\Delta B/B$ (@R=10 мм), %	$\pm 0.08$
Идентичность интеграла поля $\Delta I_B/I_B$	$\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$
Отношение поля гармоник (@R=10 мм) $B_3/B_1$	$1 \cdot 10^{-4}$
Сила корр.обмотки отн.основной, %	1
Число магнитов	32

**Таблица 3.1.2.3.** Расчетные величины интегральных гармоник на  $R = 10$  мм

b2	-1.90E-04
b3	-1.37E-04
b4	1.43E-05
b5	-3.74E-06
b6	-3.52E-06

В **Таблицах 3.1.2.4 и 3.1.2.5** показаны полученные параметры магнита ВМА, а также необходимые параметры катушки (прямоугольная).

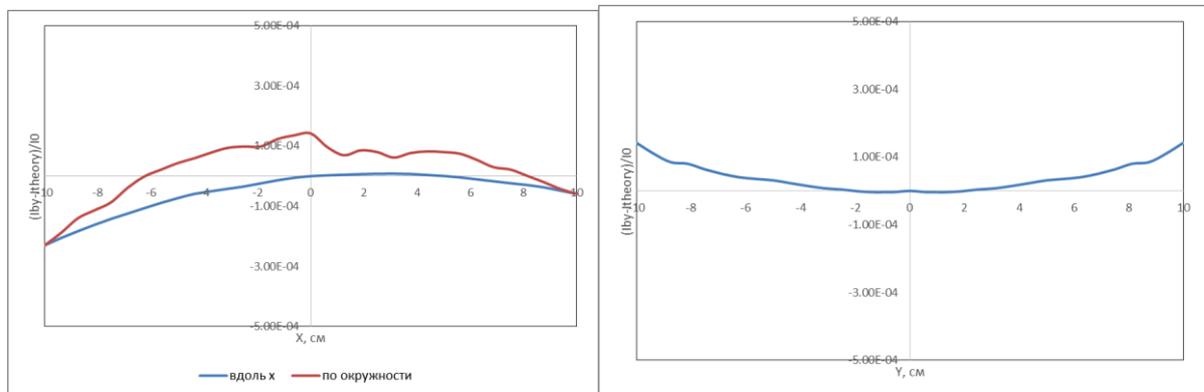
**Таблица 3.1.2.4.** Параметры, полученные в ходе 3D-оптимизации ВМА.

Длина по железу	м	0.618
Длина по железу с накладками	м	0.666
Эффективная длина	м	0.695
Радиус поворота	м	19
Длина с катушками	м	0.689
Поле в зазоре	T	0.522323
$\Delta V/V$ (вдоль оси x)		$2.35 \times 10^{-4}$
$\Delta V/V$ (по окружности R=10 мм)		$3.73 \times 10^{-4}$
$\Delta V/V$ (вдоль оси y)		$1.30 \times 10^{-4}$
Интеграл	T·м	0.363092

**Таблица 3.1.2.5.** Параметры катушки, полученные в ходе 3D-оптимизации ВМА

Ампер-витки катушки		6334.73
Макс.значение плотности тока	A/мм <sup>2</sup>	3.9
Толщина катушки	мм	47
Ширина катушки	мм	35.3

На **Рисунке 3.1.2.3** показано качество интеграла поля в магните ВМА на некотором радиусе и по двум координатам, определяемое, как отношение интеграла поля на заданной координате к интегралу поля на орбите.



**Рисунок 3.1.2.3.** Слева – относительное отличие интеграла вертикального поля  $B_y$  вдоль оси  $x$  и на окружности радиуса  $R = 10$  мм от такового на орбите. Справа – то же для координаты  $y$ .

В **Таблице 3.1.2.6** приводятся проектные параметры диполя ВМА после оптимизации конфигурации и качества поля, полученные в результате моделирования.

**Таблица 3.1.2.6.** Проектные параметры диполя ВМА.

Индукция магн.поля в центре магнита	Т	0.5278
Апертура на орбите пучка	мм	30
Длина магнитопровода	м	0.618
Эффективная длина магнита	м	0.695
Радиус поворота	м	19.0
Ток номинальный	А	426.1
Сечение шины	мм	10.7×8.0
Диаметр/площадь канала охлаждения	мм/мм <sup>2</sup>	5.8/26.421
Площадь сечения меди	мм <sup>2</sup>	58.321
Число витков в обмотке		15
Длина витка обмотки	м	1.64
Длина обмотки	м	26.1
Вес проводника основных обмоток	кг	27.0
Сопротивление обмотки при 20°C	мОм	7.74
Сопротивление линзы при 20°C	мОм	15.5
Номинальное напряжение на магните	В	6.6
Индуктивность основных обмоток	мГ	5
Номинальная мощность потерь	Вт	2814
Количество ветвей охлаждения		2
Длина ветви охлаждения	м	27.5
Перепад давления в системе охлаждения	бар	6.0
Скорость воды в канале охлаждения	м/с	3.04
Расход воды в ветви	л/мин	4.82
Расход воды на линзу	л/мин	9.64
Температура входа воды	°С	21
Диапазон нагрева воды	°С	4.2
Объем воды в системе охлаждения	л	1.45
Вес стали в магнитопроводе	кг	522.0
Общий вес диполя	кг	730.0

Для изготовления обмоток диполей ВМА используется полый медный проводник (шина) производства компании Luvata сечением 10.7×8.0 мм<sup>2</sup> с диаметром отверстия для охлаждающей жидкости 5.8 мм (номер по каталогу 8133). С учетом технологических припусков при намотке и изготовлении обмоток для уменьшения отходов вес бобины должен быть кратным 85 кг. Тогда из одного куска весом 96 кг можно будет изготовить 3 обмотки. Для изготовления всех обмоток с учетом опытного образца и запасных обмоток потребуется 2040 кг (24 куска). Максимальный вес бухты не более 500 кг. С учетом потребностей изготовления обмоток диполей DBPC потребуется общее количество проводника 8133 весом 2400 кг.

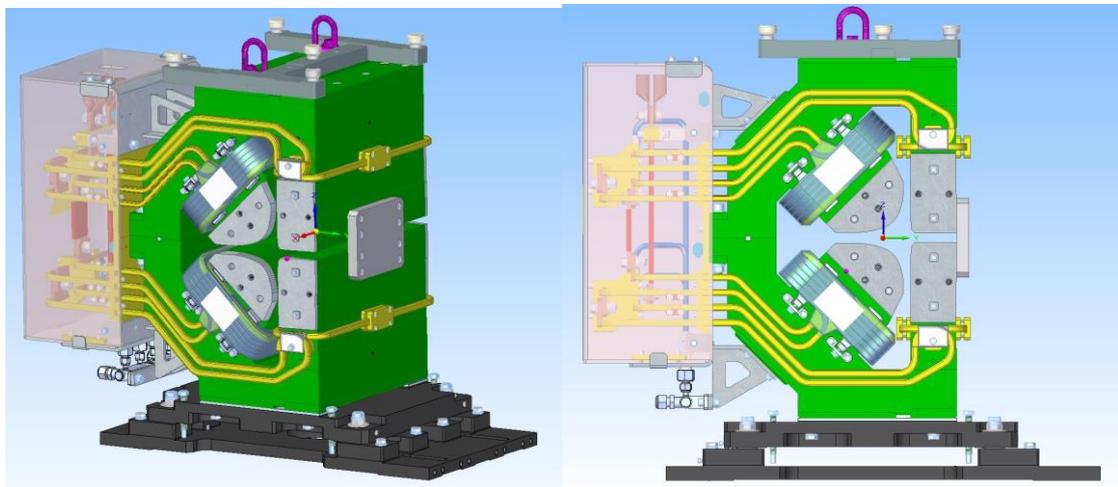
### 3.1.2.2 Дипольный магнит BDC

Для получения жесткого рентгеновского излучения в центре каждого суперпериода устанавливается дипольный магнит ВРС с полем 2 Т. Слева и справа от него помещаются магниты BDC, так, что последовательность BDC-ВРС-BDC геометрически и оптически заменяет с некоторой достаточной точностью регулярный магнит ячейки периодичности ВДА. Поскольку поле ВРС однородно, для сохранения фокусирующих свойств градиент в BDC слегка больше, чем в ВДА. Номинальные параметры магнита приведены в **Таблице 3.1.2.7**.

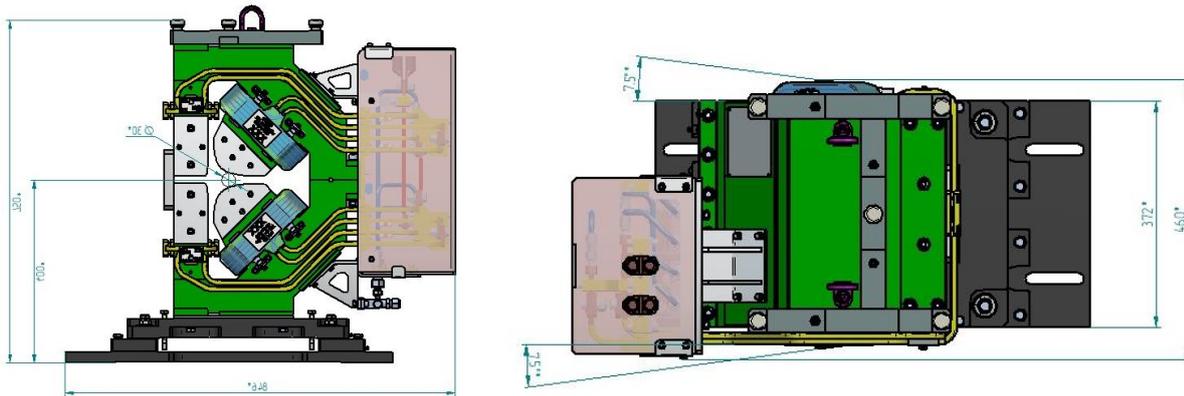
Трехмерная модель диполя показана на **Рисунке 3.1.2.4**; характерные размеры магнита даны на **Рисунке 3.1.2.5**.

**Таблица 3.1.2.7.** Номинальные параметры диполя BDC.

Количество		32
Магнитная длина	м	0.47
Поле на орбите В	Т	0.4628
Идентичность интеграла В		$\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$
Градиент на орбите $G_{ном}$	Т/м	-10.7487
Идентичность интеграла G		$\pm 0.5 \cdot 10^{-4}$
Однородность поля $\Delta B/B$	%	$\pm 0.03$
R область хорошего поля	мм	10
Межполюсный зазор на орбите $2h$	мм	15



**Рисунок 3.1.2.4.** Модель диполя BDC.



**Рисунок 3.1.2.5.** Внешний вид и основные размеры диполя ВDC.

Магнитопровод ВDC – шихтованный, исходя из технологических соображений; торцевые накладки на полюса, позволяющие регулировать магнитную длину и интегральные характеристики поля – сплошные. Магнитопровод прямой, что упрощает изготовление диполя. Интегральные параметры диполя рассчитывались по реальной орбите. В **Таблице 3.1.2.8** приводятся первые пять мультипольных коэффициентов разложения поля в медианной плоскости, полученные путем деления соответствующих интегральных значений на магнитную длину.

**Таблица 3.1.2.8.** Мультипольные коэффициенты разложения поля ВDC.

$B$	$T$	0.463298
$B'$	$T/m$	-10.78223
$B''$	$T/m^2$	-0.00438
$B'''$	$T/m^3$	14.98128
$B^{IV}$	$T/m^4$	2984.84

Расчётные технические параметры дипольного магнита ВDC приведены в **Таблице 3.1.2.9.**

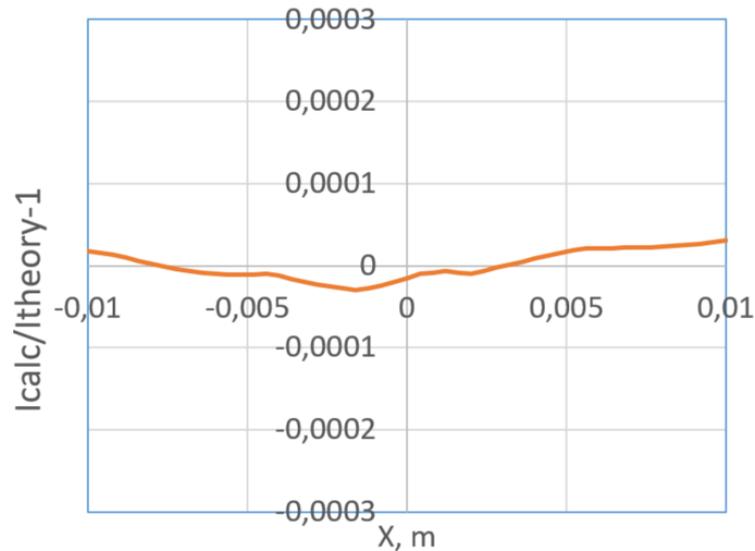
**Таблица 3.1.2.9.** Номинальные расчётные технические параметры магнита ВDC.

Ампер-витки		6620
Число витков в основной катушке		11
Ток магнита	$A$	601.8182
Интеграл поля	$T \cdot m$	0.220186
Поле в центре магнита	$T$	0.463298
Интегральный градиент	$T/m$	-10.7822
Эффективная длина	$m$	0.475257
Запасённая энергия	$Дж$	517.22
Индуктивность магнита	$мГн$	2.856

На **Рисунке 3.1.2.6** приводится относительное отличие интеграла поля на орбите от идеального в зависимости от горизонтальной координаты:

$$I_{calc}(x) = \int_{-S}^{+S} B_{calc}(x, s) ds; \quad B_{calc}(x, s) = B_0(s) + G(s)x + \frac{1}{2}S(s)x^2 + \dots$$

$$I_{theo}(x) = \int_{-S}^{+S} B_{theo}(x, s) ds; \quad B_{theo}(x, s) = B_0(s) + G(s)x$$



**Рисунок 3.1.2.6.** Качество интеграла поля на орбите магнита BDC.

Интегрирование производится вдоль численно найденной орбиты в пределах, достаточно превышающих длину ярма чтобы учесть область нарастания и спада поля.

В **Таблице 3.1.2.10** даны конструкционные параметры магнита BDC.

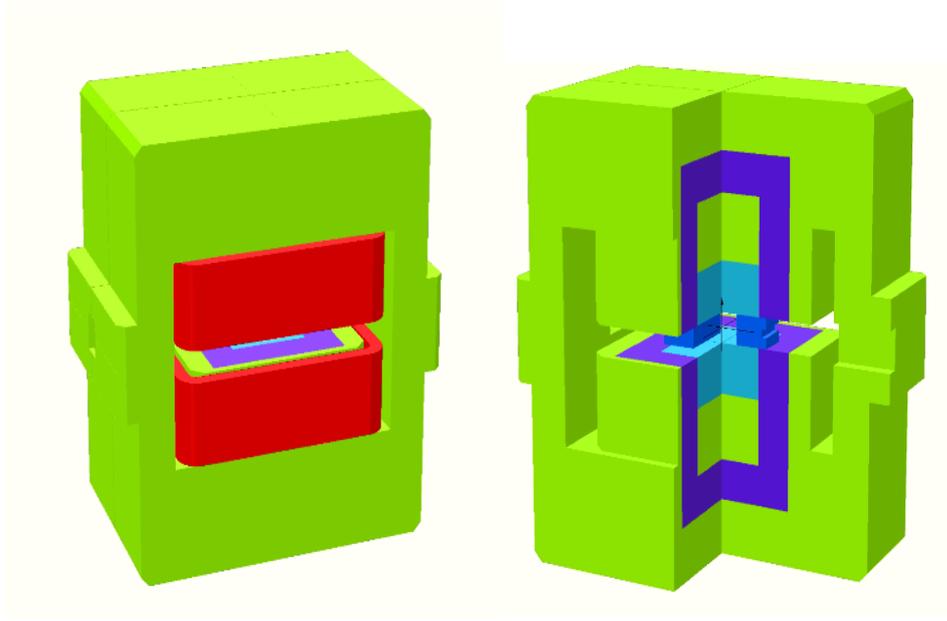
### 3.1.2.3 Дипольный магнит ВРС

Дипольный магнит ВРС служит для получения жесткого спектра синхротронного излучения и заменяет (вместе с двумя магнитами BDC) магнит ВМА в центральной ячейке каждого суперпериода. Таким образом, в магнитной структуре СКИФ имеется 16 коротких диполей ВРС с полем 2 Т.

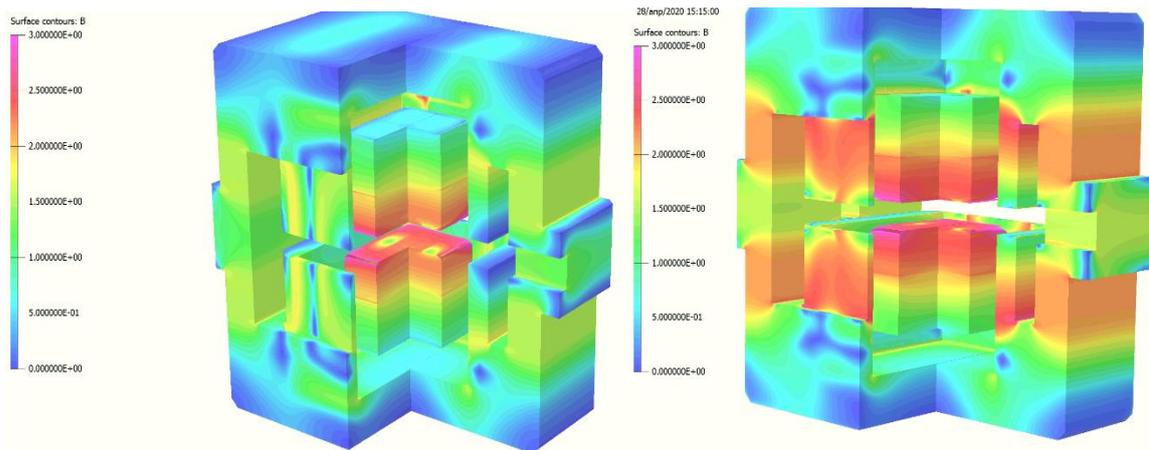
Магнитное поле диполя создается набором постоянных магнитов NdFeB, собранных и закрепленных внутри ярма из магнитомягкого железа, как это показано на **Рисунке 3.1.2.7**. Полусная часть высотой 50 мм выполнена из пермендюра марки 49К2ФА во избежание насыщения (см. **Рисунок 3.1.2.8**). Для коррекции поля в магните имеется обмотка с током, позволяющая регулировать поле на орбите в диапазоне  $\Delta B \approx \pm 0.2$  Т.

**Таблица 3.1.2.10.** Параметры дипольного магнита BDC, полученные в результате конструирования.

Индукция магнитного поля	Т	0.463
Апертура	мм	30
Длина магнитопровода	м	0.447
Эффективная длина магнита	м	0.478
Радиус поворота	м	21.5
Ток номинальный	А	600
<b>Параметры обмотки</b>		
Шина OF-OK,		№6092
Сечение шины	мм	9.0×9.0-Ø6
Площадь канала охлаждения	мм <sup>2</sup>	28.274
Площадь сечения	мм <sup>2</sup>	52.726
Суммарное число витков обмотки		11+1=12
Число витков обмотки		24
Суммарная длина обмотки	м	14+2.5=16.5
Вес проводника всех обмоток	кг	16
Сопротивление обмотки при 20°C	МОм	5.48
Сопротивление линзы при 20°C	МОм	11
Номинальное напряжение на магните	В	6.6
Индуктивность основных обмоток	мГн	2.8
Номинальная мощность потерь	Вт	3970
<b>Параметры системы охлаждения</b>		
Количество ветвей охлаждения		2
Длина ветви охлаждения	м	16.5
Перепад давления в системе охлаждения	бар	5.93
Скорость воды в канале охлаждения	м/с	4.2
Расход воды в ветви	л/мин	7.15
Расход воды на линзу	л/мин	14.3
Температура входа воды	°С	21
Диапазон нагрева воды	°С	4
Общий вес диполя с подставкой	кг	670



**Рисунок 3.1.2.7.** Дипольный магнит ВРС. Ядро магнита показано зеленым цветом, постоянные магниты – синим, пермендюрый полюс – голубым и корректирующая обмотка – красным.



**Рисунок 3.1.2.8.** Карта насыщения ядра и полюса магнита ВРС.

Технические требования на диполь ВРС приведены в **Таблице 3.1.2.11.**

**Таблица 3.1.2.11.** Требования на основные параметры диполя ВРС.

Количество		16
Магнитная длина	м	0.1481
Поле на орбите В	Т	2.0510
Однородность поля $\Delta B/B$	%	$\pm 0.03$
Радиус области хорошего поля	мм	10
Радиус вписанной в полюсы окружности	мм	15

Параметры магнита, полученные в результате численного моделирования и оптимизации, приведены в **Таблице 3.1.2.12**. Вес магнитного материала и железа для одного магнита показан в **Таблице 3.1.2.13**; параметры токовой обмотки – в **Таблице 3.1.2.14**.

**Таблица 3.1.2.12.** Параметры дипольного магнита ВРС.

Ток в обмотке	А	0	12500
Магнитное поле в центре	Т	2.207	2.445
Интеграл поля	Т·м	0.33329	0.39198
Эффективная длина	м	0.15101	0.16032
Макс.неоднородность интеграла поля	$\times 10^4$	2.77	42.8
Длина ярма	м	248	248
Длина магнита с катушками	м	264.2	264.2
Апертура	мм <sup>2</sup>	40×30	40×30

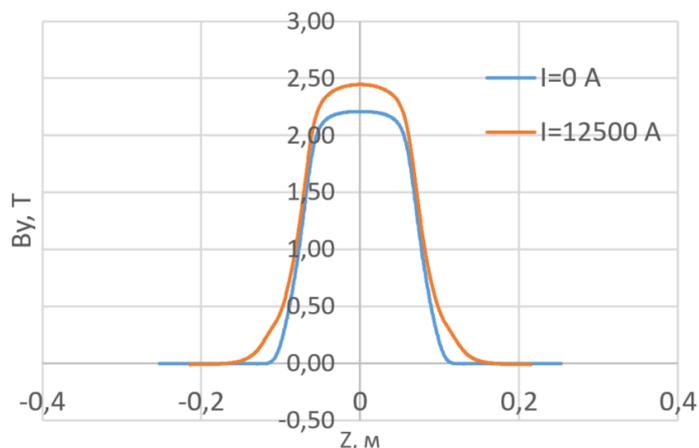
**Таблица 3.1.2.13.** Параметры магнитопровода магнита ВРС.

	Объём	Плотность	Масса
	м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	кг
Магниты	$8.83 \cdot 10^{-3}$	7400	65.3
Железо	0.030	7800	234

**Таблица 3.1.2.14.** Параметры одной токовой катушки магнита ВРС.

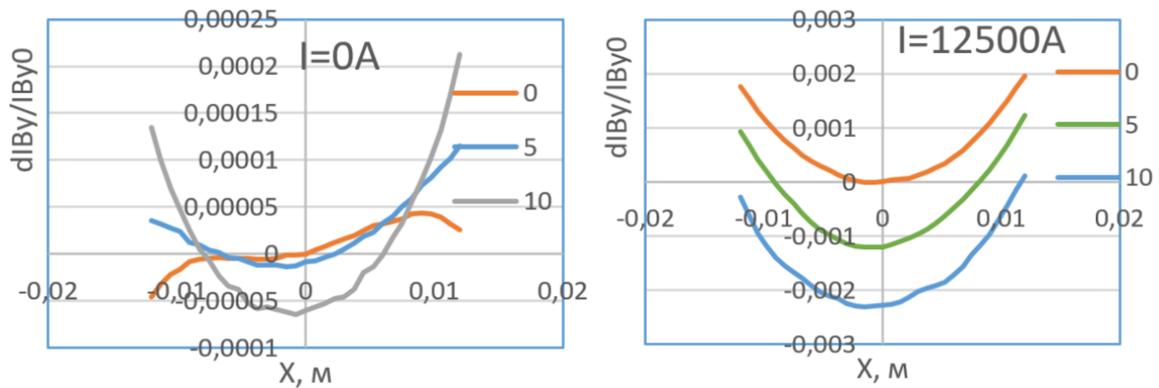
Сечение проводника	мм <sup>2</sup>	1444.2
Длина проводника	м	0.52
Максимальный ток	А	12500
Сопротивление	Ом	$1.32 \cdot 10^{-5}$
Мощность	Вт	2066

**Рисунок 3.1.2.9** показывает продольное распределение вертикального поля в магните для нулевого и максимального токов в обмотке.



**Рисунок 3.1.2.9.** Распределение вертикального поля вдоль оси диполя ВРС.

**Рисунок 3.1.2.10** показывает неоднородность интеграла поля в зависимости от горизонтальной координаты для различной вертикальной координаты.



**Рисунок 3.1.2.10.** Интегральная неоднородность вертикального поля  $B_y$  (для различной вертикальной координаты  $y = 0, 5, 10$  мм) диполя ВРС с разным током в катушке.

**Таблица 3.1.2.15** показывает параметры диполей ВРС, полученные в процессе конструирования.

### 3.1.3 Квадрупольные магниты

Дипольные магниты формируют замкнутую орбиту пучка. Два типа диполей (BDA и BSA) содержат поперечный градиент поля и участвуют в фокусировке пучка. Дипольные магниты и их параметры перечислены в **Таблице 3.1.2.1**.

Квадрупольные магниты (линзы) служат для фокусировки пучка, формирования требуемого поведения оптических функций и, в итоге, для получения основных параметров накопителя. Всего в магнитной структуре накопителя СКИФ имеется 256 квадрупольных линз. Для минимизации эмиттанса квадрупольные линзы AFA и AFC содержат вертикальную дипольную компоненту поля, что достигается небольшим смещением квадрупольного магнита по горизонтали.

Основные параметры квадрупольных линз приведены в **Таблице 3.1.3.1**. Номинальные параметры соответствуют базовой структуре, максимальные нужны для настройки структуры с учетом возможного влияния вставных устройств.

Линзы QFB, QFA и QDA одинаковы по конструкции (за исключением длины) и свойствам поля. Их задача – обеспечение оптики в согласующих участках и прямолинейных промежутках. Линзы QFA<sub>i</sub> и QDA<sub>i</sub> размещаются в инжекционном промежутке и требуют большей апертуры, чтобы удовлетворять траектории инжекции, чем регулярные QFA и QDA, однако изготавливаются линзы инжекционного промежутка из регулярных линз путем небольшой переделки. Линзы AFA и AFC размещены в ячейках периодичности, обеспечивающих малый эмиттанс. Для лучшего согласования дисперсионной функции в дипольном магните эти линзы содержат небольшое вертикальное поле.

**Таблица 3.1.2.15.** Технические параметры диполя ВРС.

Индукция магнитного поля, Т	2.05÷2.544
Вертикальная апертура, мм	30
Длина магнитопровода, м	0.248
Эффективная длина магнита, м	0.147
Ток номинальный, А	782
Шина токовой обмотки ОФ-ОК,	№8133
Сечение шины, мм	10.7×8.0-Ø5.8
Площадь канала охлаждения, мм <sup>2</sup>	26.421
Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	58.321
Количество витков в обмотке	16
Длина витка обмотки, м	0.954
Длина обмотки, м	15.9
Вес проводника основных обмоток, кг	17.0
Сопротивление обмотки при 20°C, мОм	4.7
Сопротивление линзы при 20°C, мОм	9.4
Номинальное напряжение на магните, В	7.4
Индуктивность основных обмоток, мГ	2.4 - 0.07
Номинальная мощность потерь, Вт	5750
Количество ветвей охлаждения	2
Длина ветви охлаждения, м	16.1
Перепад давления в системе охлаждения, бар	6.0
Скорость воды в канале охлаждения, м/с	3.29
Расход воды в ветви, л/мин.	5.2
Расход воды на линзу, л/мин.	10.4
Температура входа воды, °С	21
Диапазон нагрева воды, °С	7.9
Объем воды в системе охлаждения, л	0.85
Вес стали магнитопровода, кг	195.0
Общий вес диполя, кг	380.0

**Таблица 3.1.3.1.** Основные параметры квадрупольных линз.

Имя	$L_{eff}$ , м	$G_{nom/max}$ , Т/м	В, Т	Кол-во
QFA	0.3	43.975/70	0	30
QDA	0.3	-44.587/70	0	30
QFA <sub>i</sub>	0.3	43.975/55	0	2
QDA <sub>i</sub>	0.3	-44.587/55	0	2
AFA	0.15	51.521/55	-0.257	128
AFC	0.15	49.875/55	-0.349	32
QFB	0.15	48.664/70	0	32

### 3.1.3.1 Квадрупольные линзы QFB, QFA и QDA

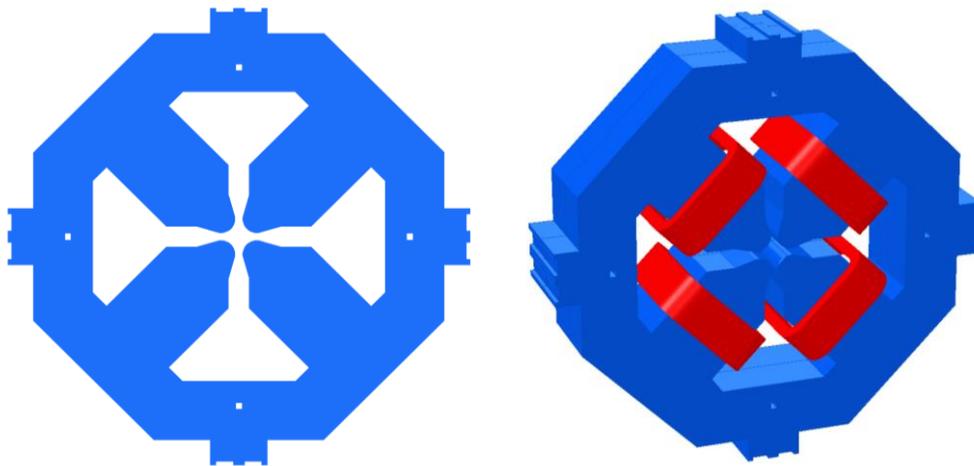
Требования, предъявляемые к этим магнитам приведены в **Таблице 3.1.3.2.**

**Таблица 3.1.3.2.** Спецификации квадрупольной линз QFB, QDA и QFA.

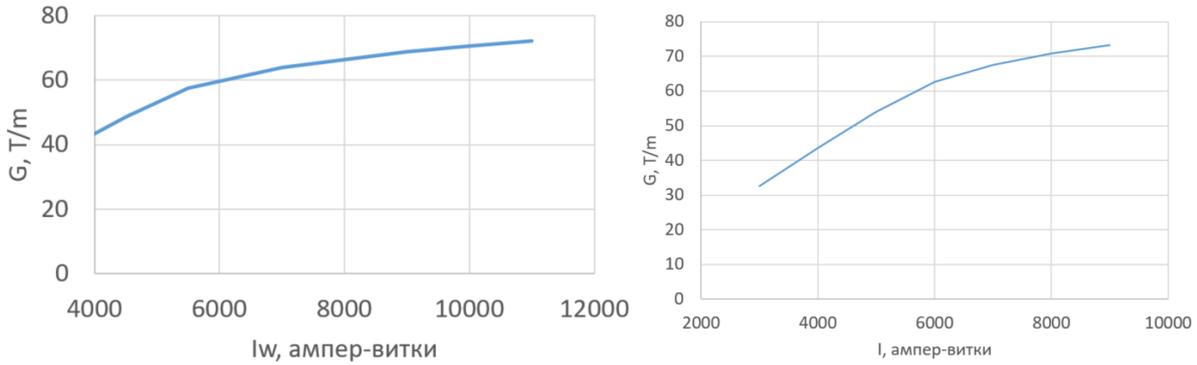
Тип		QFB	QDA, QFA
Количество		32	60
Градиент номинальный $G_{\text{ном}}$	Т/м	48.63	43.975/ -44.587
Градиент максимальный $G_{\text{max}}$	Т/м	70	70
Качество поля $\Delta B/B$	%	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$
Радиус области хорошего поля	мм	10	10
Магнитная длина $L_{\text{eff}}$	м	0.15	0.30
Вписанный в полюса радиус	мм	15	15
Отн.амплитуда гармоники ( $R_{\text{ref}}=10$ мм):			
B6/B2		$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
B10/B2		$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Расчёты магнитных полей проводились методом конечных элементов с помощью пакета Opera Simulation (Dassault Systems). Ярмо линз – шихтованное с коэффициентом заполнения 98%. Для расчётов бралась электротехническая сталь M1200-100A с клеевым покрытием Stabolit 70. Профиль пластины ярма и трехмерная модель линзы QFB показаны на **Рисунке 3.1.3.1** (QDA, QFA отличаются только длиной).

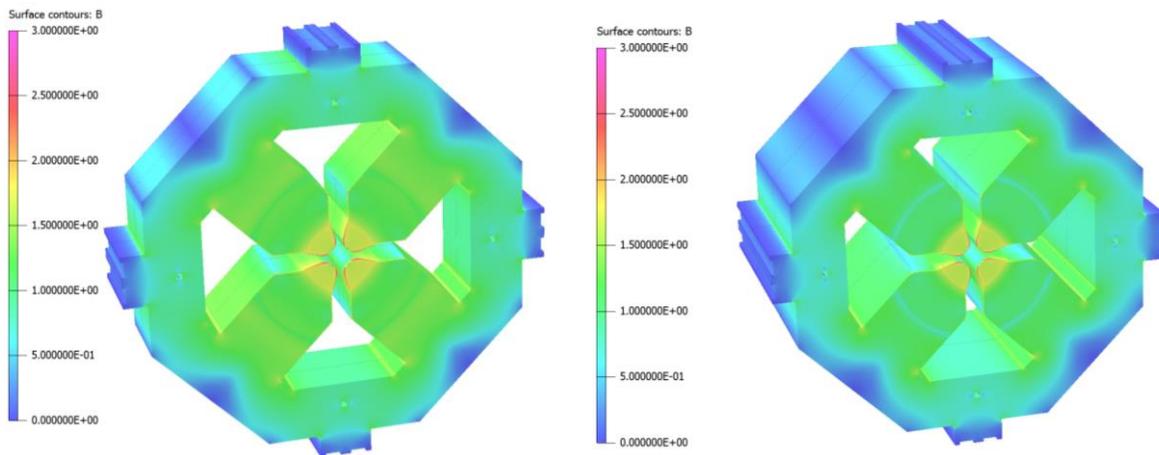
Изменение градиента в центре магнита при подъёме тока в катушках линз показано на **Рисунке 3.1.3.2.**



**Рисунок 3.1.3.1.** Квадрупольная линза QFB. Профиль ярма – слева, трехмерная модель – справа.



**Рисунок 3.1.3.2.** Зависимость градиента в центре линзы QFB (слева) и QDA, QFA (справа) от ампервитков питания.



**Рисунок 3.1.3.3.** Цветом показана карта насыщения ярма линз QFB (слева) и QDA, QFA (справа) при максимальном градиенте.

В Таблице 3.1.3.3 приведены технические параметры линз.

**Таблица 3.1.3.3.** Технические параметры линз QFB и QDA, QFA для номинального/максимального токов.

		<b>QFB</b>	<b>QDA, QFA</b>
Длина ярма	мм	133.34	283.32
Фаска 45°, длина	мм	2	1.5
Ампервитки/катушка		4500/10000	4100/8000
Ток питания	А	150/333.3	136.7/266.7
Количество витков		30	30
Градиент	Т/м	48.66/70.74	44.66/70.77
Интеграл градиента	Т	7.29/10.37	13.42/20.79
Эффективная длина	мм	149.8/146.6	300/294
Запасённая энергия	Дж	185.9/467.4	297.3/813.7
Индуктивность 4-х катушек	мГн	16.5/8.4	31.8/22.9

В Таблице 3.1.3.4 приведены основные гармоники для рассматриваемых линз, показывающие относительное отличие магнитного поля от идеального на радиусе 10 мм для проектного уровня поля основной, второй, гармоники.

**Таблица 3.1.3.4.** Соотношение интегральных амплитуд гармоник магнитного поля номера  $n$  на радиусе 10 мм, приведенных к полю основной гармоники 2 для номинального значения тока питания (4500 ампервитков для QFB и 4100 ампервитков для QDA, QFA).

<b>n</b>	<b>QFB</b>	<b>QDA, QFA</b>
6	2.70E-05	1.14E-05
10	-7.77E-05	-6.35E-05
14	2.57E-06	3.91E-06

В Таблице 3.1.3.5 приведены основные параметры катушки возбуждения линз QFB, QDA, QFA. Все катушки изготавливаются по единой технологии из одинаковой медной шинки и отличаются только длиной витка.

**Таблица 3.1.3.5.** Основные параметры катушки возбуждения линз QFB, QDA, QFA.

		<b>QFB</b>	<b>QDA, QFA</b>
Количество витков		30	30
Сопrotивление	Ом	0.011	0.016
Сечение проводника	мм	7×7	7×7
Диаметр водяного канала	мм	4	4

### 3.1.3.2. Квадрупольные линзы AFA, AFC

Обе линзы смещены в горизонтальном направлении так, чтобы на орбите появилось требуемое вертикальное поле, поэтому диаметр апертуры этих линз увеличен до 38 мм. Спецификации линз перечислены в Таблице 3.1.3.6.

**Таблица 3.1.3.6.** Требования на основные параметры квадрупольей AFA и AFC.

Линза		AFA	AFC
Количество		128	32
Градиент номинал $G_{nom}$	Т/м	51.48	49.84
Градиент максимальный $G_{max}$	Т/м	55	55
Угол поворота	мрад	-3.86	-5.23
Магнитная длина $L$	м	0.15	0.15
Радиус вписанной окружности	мм	19	19
Область хорошего поля $R$	мм	10	10
Качество поля $\Delta B/B$	%	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$
B6/B2		$\pm 3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$
B10/B2		$\pm 3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$

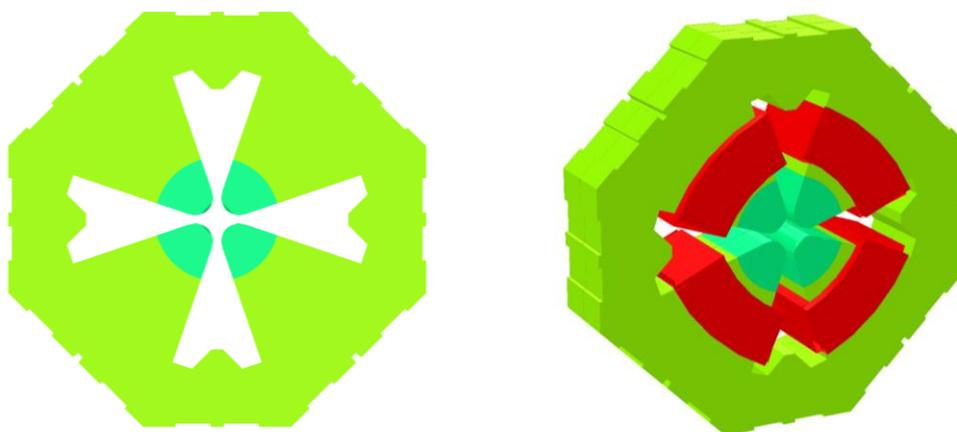
Ярмо линз состоит из 4-х квадрантов, каждый из которых изготавливается из сплошного куска электротехнической стали. Для достижения требуемых градиента и качества поля полюсная часть квадранта изготавливается из пермендюра (**Рисунок 3.1.3.4**).

Изменение градиента в центре линзы в зависимости от полного тока питания показано на **Рисунке 3.1.3.5**.

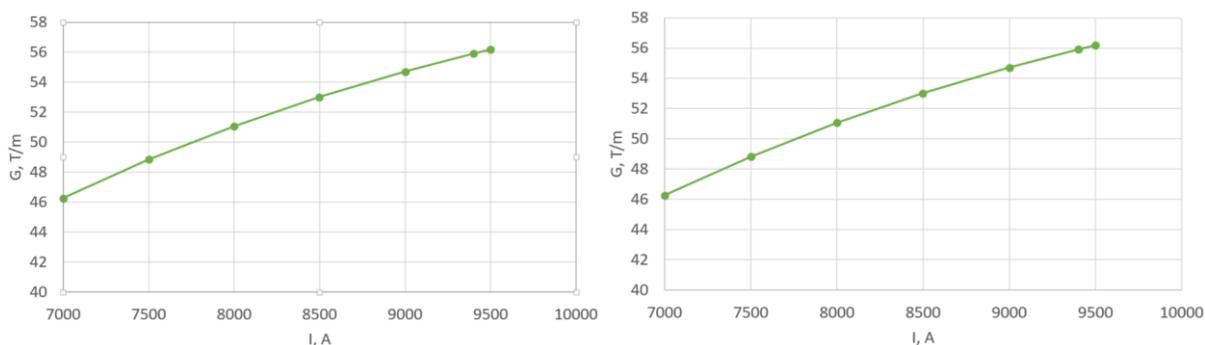
На **Рисунке 3.1.3.6** показано насыщение ярма линз AFA и AFC при максимальном градиенте.

**Таблица 3.1.3.7** дает расчетные значения параметров линз AFA и AFC для проектного/максимального градиентов.

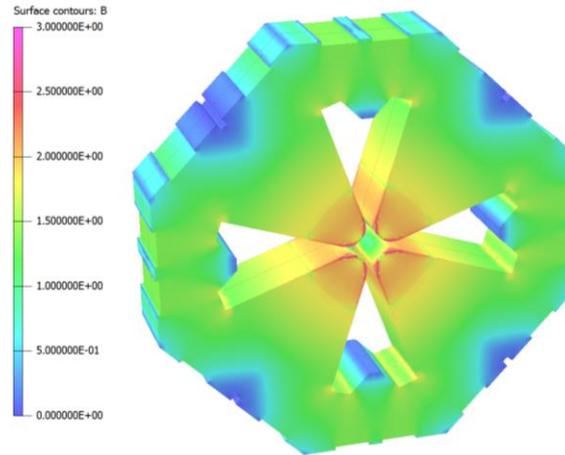
В **Таблице 3.1.3.8** приведены основные гармоники для рассматриваемых линз, показывающие относительное отличие магнитного поля от идеального на радиусе 10 мм для проектного уровня поля основной, второй, гармоники.



**Рисунок 3.1.3.4.** Расчетный профиль магнитопровода линз AFA и AFC (слева). Трехмерная модель линз.



**Рисунок 3.1.3.5.** Изменение градиента в центре магнита AFA (слева) и AFC (справа) при подъёме полного тока в катушках.



**Рисунок 3.1.3.6.** Насыщение ярма линз AFA и AFC при максимальном градиенте.

**Таблица 3.1.3.7.** Расчётные параметры линз AFA и AFC для номинального/максимального токов.

		<b>AFA</b>	<b>AFC</b>
Радиус апертуры	мм	19	19
Длина магнитопровода	мм	130	130
Фаска 45°, длина	мм	3.4	3.4
Ампервитки		8000/9400	7700/9400
Ток	А	266.7/313.3	257/313
Количество витков		30	30
Градиент	Т/м	51.06/55.92	49.76/55.92
Интеграл градиента	Т	7.72/8.44	7.52/8.44
Эффективная длина	мм	151.11/151.01	151.11/151.01
Запасённая энергия	Дж	440.2/542.2	416/38/542.2
Индуктивность линзы	мГн	12.4/11.0	12.6/11.0

### 3.1.4 Секступольные магниты

Секступольные магниты (линзы) служат для коррекции зависимости бетатронных частот частицы от энергии (коррекции хроматизма). Поле секступольной линзы зависит от координат квадратичным образом; наличие таких магнитов делает движение частицы нелинейным и ограничивает область устойчивого движения (динамическую апертуру). Для экономии места на кольце на полюсах секступольных линз размещаются небольшие корректирующие катушки, создающие горизонтальную, вертикальную и (skew-) квадрупольную компоненты поля в зависимости от индивидуальных токов питания. Такое решение является весьма распространенным для источников СИ. **Таблица 3.1.4.1** суммирует требования, предъявляемые к секступольным магнитам.

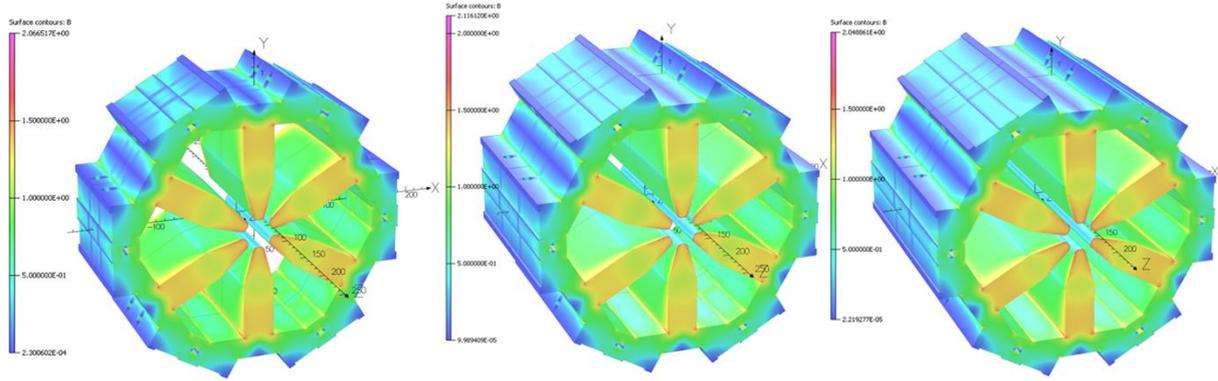
**Таблица 3.1.3.8.** Соотношение интегральных амплитуд гармоник магнитного поля номера  $n$  на радиусе 10 мм, приведенных к полю основных гармоник (1 и 2) для номинального значения тока питания и горизонтального смещения (8000 ампервитков и 5 мм для AFA и 7700 ампервитков и 7 мм для AFC).

<b>n</b>	<b>AFA</b>	<b>AFC</b>
1	-0.50302	-0.70404
2	1	1
3	-7.6E-05	-1.86E-04
4	9.39E-05	2.42E-04
5	-9.1E-05	-1.48E-04
6	1.1E-05	-1.73E-05
7	3.76E-05	8.01E-05
8	-2.5E-05	-7.7E-05
9	2.76E-05	4.49E-05
10	-2.7E-05	6.86E-06
11	1.14E-05	-1.5E-05
12	1.39E-05	2.6E-05
13	-3.2E-06	-7.9E-06
14	1.22E-05	7.7E-06
15	-1E-05	2.27E-05

**Таблица 3.1.4.1.** Требования к секступольным линзам накопителя СКИФ.

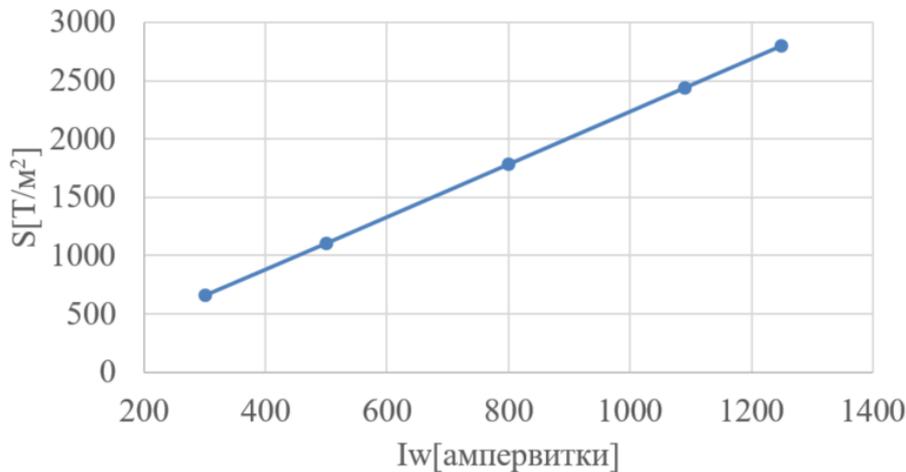
<b>Секступоли</b>					<b>Коррекция</b>	
Тип	$L_{eff}$ , см	$S_{nom}$ , Т/м <sup>2</sup>	$S_{max}$ , Т/м <sup>2</sup>	Число	$B_{xy}$ , Т	$G_{skew}$ , Т/м
SFA	15	2314.694	2800	32	0.01	1
SDA/SDB/SDC	25	-2381.034	2800	160	0.01	1
SFB/SFC	30	2314.694	2800	64	0.01	1
Всего				256		

Все секступоли имеют идентичную конструкцию и различаются только длиной. Шихтованное ярмо производится из стали М1200-100А. Основные катушки будут выполнены из шины OF-OK №8215 с квадратным сечением 5×5 мм<sup>2</sup> и отверстием под воду Ø2.5 мм. Всего на каждый полюс будет 12 витков. Для катушек коррекции предполагается использовать шинку DAMID 200 с сечением по меди 1.0×1.2 мм<sup>2</sup>. На каждый полюс будет 136 витков.



**Рисунок 3.1.4.1.** Цветом показан уровень насыщения магнитопровода для линз SFA, SDA, SFB при максимальном градиенте.

На **Рисунке 3.1.4.1** показан уровень насыщения магнитопровода для линз SFA, SDA, SFB при максимальном градиенте. Зависимость секступольного градиента в центре линзы от тока питания основной обмотки показана на **Рисунке 3.1.4.2**.



**Рисунок 3.1.4.2.** Зависимость градиента в центре линзы от тока питания.

Технические требования для секступольных линз суммированы в **Таблице 3.1.4.2**.

**Таблица 3.1.4.2.** Требования на основные параметры секступольных линз.

	<b>SFA</b>	<b>SDA</b>	<b>SFB</b>
Магнитная длина $L_{eff}$ , см	15	25	30
Радиус апертуры, мм	15	15	15
Номинальный градиент $B''$ , Т/м <sup>2</sup>	2314.7	2381.0	2314.7
Макс.градиент $B''_{max}$ , Т/м <sup>2</sup>	2800	2800	2800
Инт.однородность поля (R=10 мм), %	±0.3	±0.3	±0.3
Количество	32+1	160+1	64+1

Расчетные значения интеграла поля основных высших гармоник, нормированных на поле секступольной компоненты приведены в **Таблице 3.1.4.3**.

**Таблица 3.1.4.3.** Расчетные величины интегральных гармоник, нормированных на основную при  $r = 10$  мм для номинального значения секступольного градиента.

	<b>SFA</b>	<b>SDA</b>	<b>SFB</b>
$b_9/b_3$	-5.43E-05	4.30E-05	1.28E-04
$b_{15}/b_3$	-6.18E-04	-6.30E-04	-6.52E-04

В **Таблицах 3.1.4.4 и 3.1.4.5** показаны полученные, после трехмерной оптимизации поля, параметры секступольных линз, а также, основных и корректирующих токовых катушки, которые одинаковы для всех типов линз. Для производства магнитопровода секступольных линз планируется использовать листовую электротехническую сталь M1200-100A.

**Таблица 3.1.4.4.** Параметры, полученные в ходе оптимизации 3D-модели секступолей.

	<b>SFA</b>	<b>SDA</b>	<b>SFB</b>
<b>Секступольная компонента</b>			
Длина по железу, см	14.1	24.1	29.1
Ширина ярма, см	31.6	31.6	31.6
Эффективная длина, см	15	25	30
Номин.градиент в центре, Т/м <sup>2</sup>	2439.4	2440.8	2440.3
Номин.интеграл градиента, Т/м	366.9	611.8	734.1
Макс.градиент в центре, Т/м <sup>2</sup>	2778.0	2791.1	2802.4
Макс.интеграл градиента, Т/м	417.5	699.3	842.4
<b>Коррекции</b>			
Интеграл G, G <sub>s</sub> , Т	0.15	0.15	0.15
Отн.поле <sup>1)</sup> (@R=10 мм) B'''/G	±0.36	±0.37	±0.37
Интеграл B <sub>x,y</sub> , Т·мм	1.5	1.5	1.5
Однородность B <sub>x,y</sub> (@R=10 мм), %	31.5	31.8	32.0

<sup>1)</sup> Суперпозиция секступольного и градиентного (или skew-градиентного) полей приводит к появлению малой октупольной компоненты.

**Таблица 3.1.4.5.** Параметры катушек секступольных линз (на 1 катушку).

Количество витков	12
Ампервитки номинальные	1090
Ампервитки максимальные	1250
Количество витков	136
Ампервитки максимальные	400

**Таблица 3.1.4.6.** Гармоники поля секступольной линзы при включенных коррекциях.

n	SFA		SDA		SFB	
	B <sub>n</sub>	A <sub>n</sub>	B <sub>n</sub>	A <sub>n</sub>	B <sub>n</sub>	A <sub>n</sub>
0	-1.82E-03	0	3.37E-05	0	-4.62E-04	0
1	-5.04	-5.94	-8.89	-9.26	-9.33	-10.95
2	-5.14	-5.40	-8.43	-8.87	-10.08	-10.61
3	66.03	-1.73E-03	110.42	-1.11E-03	133.03	-2.51E-03
4	-1.87	1.97	-3.14	3.31	-3.78	3.98
5	-0.63	0.73	-1.09	1.23	-1.27	1.48
6	-6.05E-04	1.28E-03	8.11E-04	-4.18E-04	1.87E-04	1.20E-03
7	-0.05	-0.06	-0.09	-0.10	-0.10	-0.12
8	-0.03	-0.03	-0.05	-0.05	-0.06	-0.06
9	-7.22E-04	-6.75E-04	0.02	-3.30E-04	0.03	-3.22E-03
10	0.01	-0.01	0.02	-0.02	0.02	-0.02
11	4.35E-03	-9.20E-03	9.39E-03	-0.01	9.14E-03	-0.02

Поскольку, как уже говорилось, полюса секступольной линзы несут корректирующие обмотки, которые могут создавать дипольное (горизонтальное и вертикальное) и градиентное («нормальное» и skew-) поля, возникает вопрос о величине нежелательных мультипольных компонент, которые возникают при нарушении симметрии секступольного потенциала. Было проведено моделирование, когда секступольная компонента максимальна и корректирующие токи тоже максимальны. Получившиеся интегральные гармоники приведены в **Таблице 3.1.4.6.** Используется обычная нотация для разложения поля на гармоники

$$B_y(x, y) + iB_x(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (B_n + iA_n)(x + iy)^n,$$

где  $B_n$  и  $A_n$  отвечают за «нормальные» и skew-компоненты.

В **Таблице 3.1.4.7** приведены основные технические параметры секступольных линз.

**Таблица 3.1.4.7.** Технические параметры секступольных линз.

	SFA	SDA	SFB
<b>Секступольная линза</b>			
Индукция маг.поля (R = 10 мм), Т	0.122	0.122	0.122
Апертура, мм	30	30	30
Длина магнитопровода, см	0.1408	0.2408	0.2908
Эффективная длина линзы, см	0.1504	0.2506	0.3008
Источник тока	MPS-150-24	MPS-150-24	MPS-150-24
Ток номинальный, А	90.8	90.8	90.8
Ток максимальный, А	106.4	103.8	104.2
Шина OF-ОК	№8215	№8215	№8215
Сечение шины, мм	5.0×5.0-Ø2.5	5.0×5.0-Ø2.5	5.0×5.0-Ø2.5
Площадь канала охлаждения, мм <sup>2</sup>	4.909	4.909	4.909
Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	19.67	19.67	19.67
Количество витков в обмотке	12	12	12
Длина витка обмотки, м	0.425	0.625	0.725
Длина обмотки, м	6.2	8.6	9.8
Вес основных обмоток, кг	6.5	9.0	10.2
Сопр.обмотки при 20°C, мОм	5.46	7.6	8.6
Сопр.линзы при 20°C, мОм	32.8	45.4	51.7
Ном.напряжение на линзе, В	2.98	4.1	4.6
Макс.напряжение на линзе, В	3.6	4.7	5.5
Ном.мощность потерь, Вт	270	372	425
Макс.мощность потерь, м	385	490	570
Число ветвей охлаждения	2	2	2
Длина ветви охлаждения, м	27.5	28.5	32.1
Перепад давл.охлаждения, бар	6.0	6.0	6.0
Скорость воды охлаждения, м/с	1.88	1.62	1.53
Расход воды в ветви, л/мин	0.55	0.48	0.45
Расход воды на линзу, л/мин	1.1	0.96	0.9
Температура входа воды, °С	21	21	21
Диапазон нагрева воды, °С	3.1...4.8	4.9...7.7	5.9...9.3
Объем воды охлаждения, л	0.25	0.33	0.38
<b>Коррекция</b>			
Шина DAMID 200			
Сечение шины, мм	1.0×1.2	1.0×1.2	1.0×1.2
Количество витков в обмотке	136	136	136
Длина витка обмотки, м	0.39	0.588	0.688
Сопр.обмотки при 20°C, Ом	0.8	1.28	1.5
Макс.ток коррекции, А	3.0	3.0	3.0
Вес проводника коррекции, кг	3.4	5.1	6.0
Вес стали в магнитопроводе, кг	47.0	81.0	58.0
Общий вес секступоли, кг	120.0	181.0	200.0

### 3.1.5 Индивидуально расположенные корректоры

Кроме корректирующих обмоток, размещенных на полюсах секступольных линз, имеется 32 отдельно стоящих корректоров, в которых на едином ярме расположены обмотки, позволяющие создавать дипольное поле (горизонтальное и вертикальное) и skew-квадрупольное поле. Два корректора (тип 2 в таблице ниже), размещенных в промежутке инжекции, отличаются от остальных (тип 1) слегка увеличенной апертурой. В Таблице 3.1.5.1 приведены основные параметры отдельных корректоров.

Таблица 3.1.5.1. Требования на отдельные корректоры.

Тип	1	2
Магнитная длина, см	5	5
Вписанный в апертуру радиус, мм	15	20
Амплитуда дипольного поля, Т	0.04	0.04
Skew-градиент, Т/м	2	2
Качество поля $\Delta B/B$ ( $R = 10$ мм), %	$\pm 0.5$	$\pm 0.5$
Количество	30	2

Ярмо корректора – прямоугольная рама из стали 100-1200 на которой закреплены токопроводящие обмотки (Рисунок 3.1.5.1). Рама установлена под углом  $45^\circ$ . На каждой грани рамы находится по две катушки (дипольная и поверх нее – квадрупольная). Предполагается, что ярмо будет сделано из шихтованного железа с коэффициентом заполнения 0.98. На Рисунке 3.1.5.1 показана модель корректора.

В Таблицах 3.1.5.2 и 3.1.5.3 приведены технические параметры корректора и его катушек соответственно.

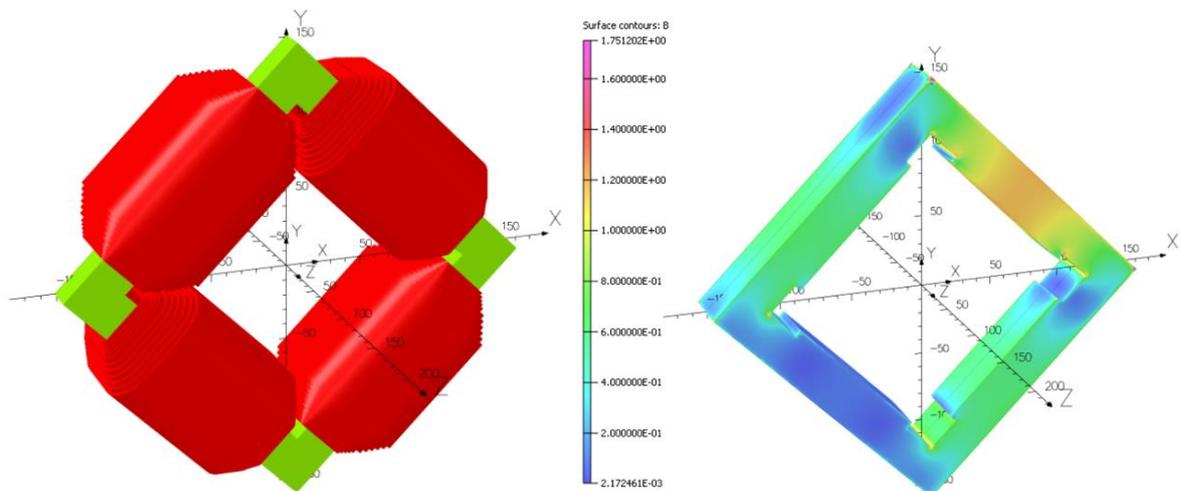


Рисунок 3.1.5.1. Модель корректора слева. Распределение насыщения в ярме корректора, когда все токи максимальны.

**Таблица 3.1.5.2.** Технические параметры корректора.

Материал ярма	M-1200-100
Габаритные размеры ярма, мм <sup>3</sup>	214×214×40
Габаритные размеры с катушками, мм <sup>3</sup>	265×265×93
Апертура ярма, мм	99
Макс.дипольное поле в центре, Т	0.010
Макс.интеграл дипольного поля, Т·мм	2.180
Эффективная длина, мм	212.29
Однородность интеграла поля (R=10 мм), %	0.5%
Запасенная энергия	1.43
Макс.skew-градиент в центре, Т/м	0.648
Макс.интеграл градиента поля, Т	0.096
Эффективная длина, мм	148.73
Однородность интеграла градиента (R=10 мм), %	0.96
Отношение гармоник a <sub>6</sub> /a <sub>2</sub> (R=10mm)	7.16E-06
Отношение гармоник a <sub>10</sub> /a <sub>2</sub> (R=10mm)	2.42E-06

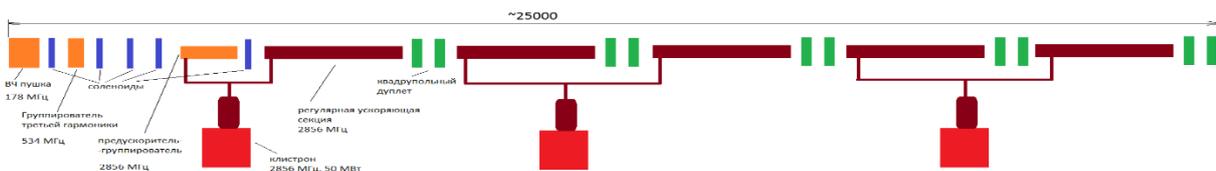
**Таблица 3.1.5.3.** Параметры катушек отдельного корректора.

Дипольная	
Количество витков	370
Ампер-витки максимальные	2200
Skew-квадрупольная	
Количество витков	420
Ампер-витки максимальные	4200

## 3.2 Вакуумная система

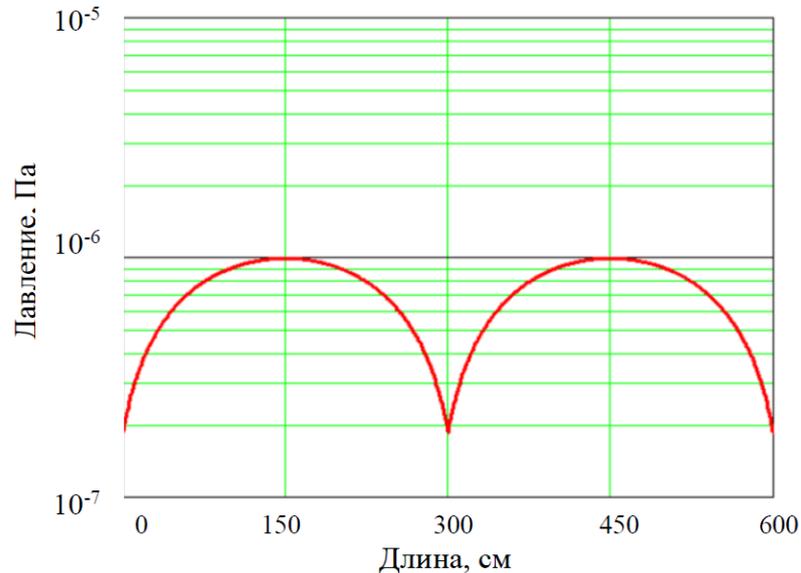
### 3.2.1 Вакуумная система линейного ускорителя

Вакуумная камера линейного ускорителя (ЛУ) разделяется на три секции электропневматическими цельнометаллическими шиберами с ВЧ-контактами. Первая секция включает источник электронов – СВЧ пушку, вторая – систему группировки и предускорения, которая заканчивается группирователем-предускорителем (**Рисунок 3.2.1.1**) и третья – регулярные ускоряющие структуры. В рабочем состоянии во всех объемах ЛУ давление остаточного газа должно быть не выше 10<sup>-6</sup> Па. Для сборки частей вакуумной камеры ЛУ используются разъемные соединения Conflat, за исключением волноводных трактов.



**Рисунок 3.2.1.1.** Схема линейного ускорителя.

Для получения вакуума в ЛУ используются магниторазрядные вакуумные насосы с быстротой откачки 100 л/с по азоту, которые располагаются на расстоянии два-три метра друг от друга. Подсоединение насосов выполняется через патрубки с фланцами Ду 100 CF, которые обеспечивают эффективную быстроту откачки магниторазрядного насоса 50 л/с по азоту. Распределение давления на шестиметровом промежутке ЛУ показано на **Рисунке 3.2.1.2**.



**Рисунок 3.2.1.2.** Распределение давления остаточного газа на шестиметровом участке вакуумной камеры линейного ускорителя. При расчетах коэффициент термического газовыделения  $4 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>·Па/с/м<sup>2</sup>, эффективная быстрота откачки насосов 50 л/с по азоту.

В каждой секции располагается по одному клапану для форвакуумной откачки, форвакуумному датчику и датчику высокого вакуума.

Форвакуумная откачка осуществляется через цельнометаллический угловой клапан Ду 40 CF при помощи безмасляной высоковакуумной откачной станции, состоящей из турбомолекулярного насоса (быстрота откачки по воздуху 80÷100 л/с) и безмасляного форвакуумного насоса (быстрота откачки 25 м<sup>3</sup>/ч).

Вакуумная камера в промежутках между ускоряющими секциями выполняется из бесшовной трубы (внутренним диаметром 33 мм и толщиной 1 мм) нержавеющей стали марки 316L. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения типа Conflat Ду 40, соединения вакуумной камеры выполнены аргонно-дуговой сваркой. Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного изменением температуры в тоннеле, применены сварные сильфонные узлы.

Все источники питания вакуумного оборудования и система автоматизации для них располагаются в 19" электрическом шкафу NEMA 12. В радиостойке располагается вакуумное оборудование.

Для питания и управления магниторазрядными насосами используются четырехканальные контроллеры питания, обеспечивающие включение/выключение насосов,

а также управление подачей высокого напряжения и измерение тока насоса. Контроллеры подключаются к коммутатору по последовательной связи и далее к управляющему компьютеру по сети Ethernet. Зная измеренный ток насоса можно оценить давление остаточных газов.

Сигналы с датчиков давления обрабатываются соответствующими контроллерами, которые, как и контроллеры насосов, подключены к коммутатору по последовательной связи.

Для управления вакуумными шиберами в линаке используется шасси с программируемыми контроллерами PLC, размещенное в радиостойке. Шасси с вакуумным PLC включает несколько модулей цифрового ввода/вывода для приема сигналов блокировок от источников питания насосов и вакуумных датчиков давления и выдачи управляющих команд на закрытие шиберов. При появлении блокировочных сигналов от контроллеров насосов и измерителей вакуума, прилегающих к данному шиберу, возникающих из-за ухудшения уровня вакуума, PLC либо отдает команду на закрытие соответствующего шибера, либо выдает сигнал соседнему PLC, который управляет этим шибером. Кроме того, каждый вакуумный PLC выдает сигнал о состоянии управляемых им шиберов на PLC системы защиты оборудования. В PLC системы защиты сигналы о состоянии всех шиберов от всех вакуумных PLC обрабатываются в соответствии с выбранным режимом работы инжектора, и затем суммарный сигнал подается на систему блокировки пушки линейного ускорителя. Также PLC системы защиты выполняет функцию диспетчера блокировочных сигналов: он принимает все сигналы, приходящие от различных датчиков и логических устройств, касающиеся обеспечения безопасной работы линака и его источников питания, и выдает суммарные сигналы, разрешающие работу, непосредственно на защищаемое оборудование. Важное внимание уделяется обеспечению снижения радиационной нагрузки на оборудование. Система EPS запрещает включение пучка, если не обеспечен режим проводки пучка до поглотителей пучка.

### 3.2.2 Вакуумная система бустерного синхротрона

Вакуумная система бустера, с периметром 158.4 м, по аналогии с бустерным синхротроном NSLS-2 [1], состоит из четырех суперпериодов (каждый из которых включает в себя поворотную секцию длиной 31 м и 8-метровый прямолинейный промежуток), изолированных друг от друга цельнометаллическими электропневматическими затворами Ду 63, с временем срабатывания  $\sim 2\div 3$  с. Высокий вакуум обеспечивается магниторазрядными насосами (45 л/с), расположенными на расстоянии  $2\div 2.3$  м друг от друга (по 15 насосов в поворотных секциях и по 2-3 в прямолинейных промежутках). Схема вакуумной системы синхротрона приведена на **Рисунке 3.2.2.1**.

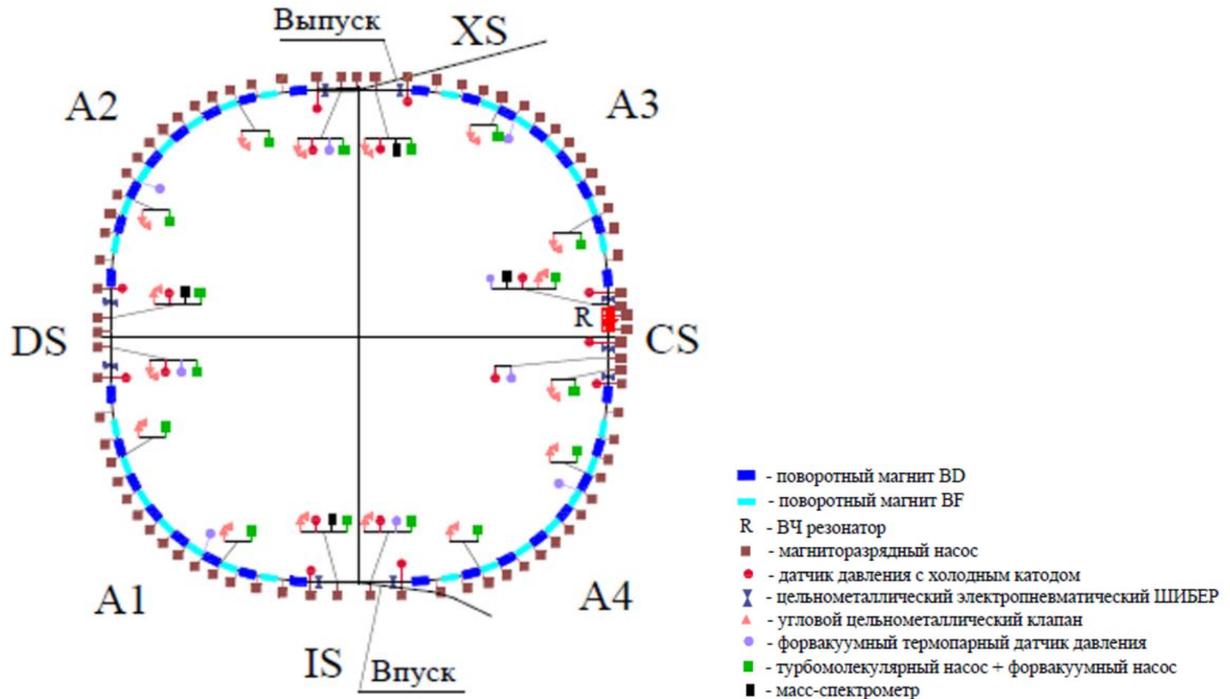
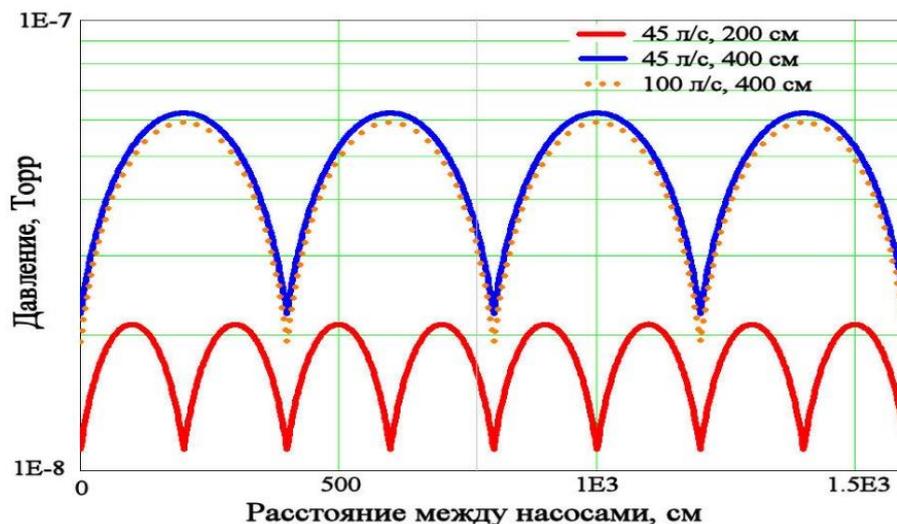


Рисунок 3.2.2.1. Схема вакуумной системы бустерного синхротрона СКИФ.

Для обеспечения необходимого вакуума и для соблюдения электромагнитной гладкости камеры, порты откачки изготавливаются из сплошной трубы с продольными пазами в основной камере с суммарной площадью  $5.2 \text{ см}^2$  (Рисунок 3.2.2.3). Эффективная быстрота откачки магниторазрядного насоса определяется площадью пазов и составляет 13 л/с.

На Рисунке 3.2.2.2 представлено распределение давления остаточного газа на 16-метровом участке поворотной секции для различного размещения насосов и быстроты откачки. Так как быстрота откачки определяется размерами пазов в откачных постах, то увеличение быстроты откачки магниторазрядных насосов с 45 л/с по воздуху до 100 л/с, приводит к увеличению эффективной быстроты откачки всего лишь на 3 л/с. При этом среднее динамическое давление в камере уменьшится на  $9 \div 10 \%$ . С другой стороны, увеличение расстояния между насосами в 2 раза, при быстроте откачки 45 л/с, влечет за собой ухудшения вакуума в 3 раза. Если же увеличить быстроту откачки насосов, при таком расположении, до 100 л/с, динамическое давление улучшится на  $5 \div 7 \%$ .



**Рисунок 3.2.2.2.** Распределение давления газа в поворотной секции, в зависимости от быстроты действия насосов. Насосы с быстротой откачки 45 л/с располагаются через каждые 2 м (сплошная красная линия), насосы 45 л/с (синяя линия) и 100 л/с (пунктир) через 4 м

Таким образом, оптимальный результат достигается при использовании насосов с быстротой откачки 45 л/с (по воздуху), расположенных через каждые  $2 \div 2.3$  м.

В каждом промежутке располагается по 2 клапана для форвакуумной откачки, по 1 форвакуумному датчику и по 2 датчика высокого вакуума. В прямолинейных промежутках также устанавливаются по 1 масс-спектрометру.

В **Таблице 3.2.2.1** представлен полный перечень вакуумного оборудования бустера.

**Таблица 3.2.2.1.** Вакуумное оборудование синхротрона-бустера.

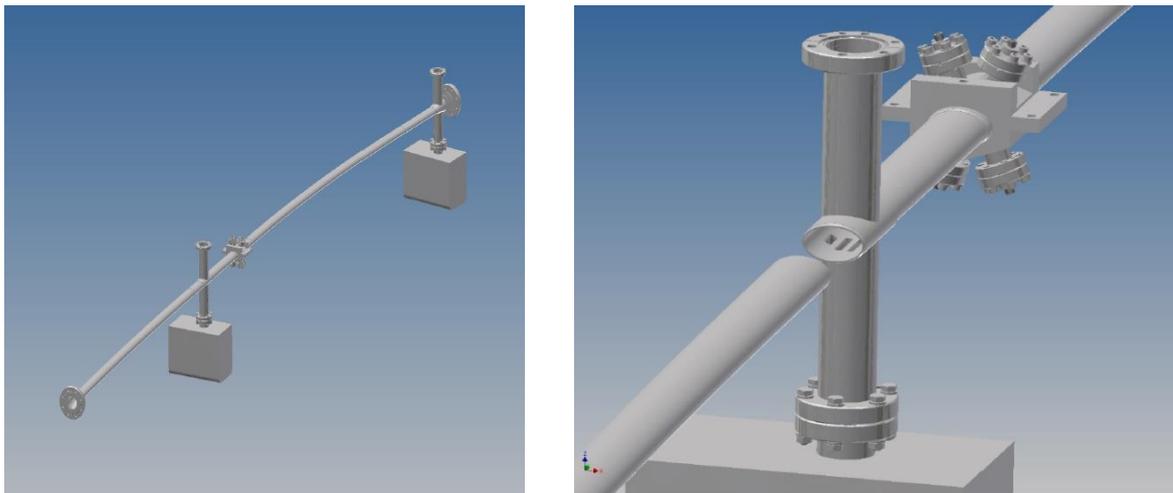
Название	НМД	ФВ-датчик	НВ-датчик	RGA	Шиббер	ФВ-клапан	IPC	GC
Поворот 1	16	1	2	1	2	2	8	1
Диагностика	2	1	2	-	-	2	2	1
Поворот 2	16	1	2	-	2	2	8	1
Промежуток выпуска	3	1	2	-	-	2	2	1
Поворот 3	16	1	2	1	2	2	8	1
Резонатор	6	2	3	1	1	2	-	-
Поворот 4	16	1	2	1	2	2	8	1
Промежуток впуска	2	1	2	-	-	2	2	1
Итого	77	9	17	4	9	16	36	7

Обозначения в таблице: НМД – магниторазрядный насос, RGA – масс-спектрометр, IPC – источник питания магниторазрядного насоса, GC – контроллер для датчиков давления.

Выбор материала для большинства вакуумных камер бустера обуславливается импульсным режимом работы магнитов. Необходимо использовать материалы с низким удельным сопротивлением, например, нержавеющие марки стали аустенитного класса. В

таком случае искажение ведущего магнитного поля является незначительным (величина отклонения варьируется в диапазоне от десятых долей до нескольких процентов, для различных магнитов), что легко компенсируется источниками питания магнитов. При изготовлении камер из алюминиевых или медных сплавов искажения магнитных полей будут увеличены в 26 и 41 раз, соответственно.

Вакуумная камера в поворотных магнитах, выполненная из бесшовной трубы нержавеющей стали марки 316 L, представляет собой в поперечном сечении эллипс  $41 \times 24 \text{ мм}^2$  (молекулярная проводимость камеры  $3.2 \text{ л} \cdot \text{м}/\text{с}$ ). Из-за малого расстояния между магнитами в поворотных секциях, вакуумная камера одного гирдера (магнитной сборки с общей несущей балкой) включает в себя дипольные камеры VD и VF-магнитов, короткие прямолинейные промежутки для мультипольных магнитов, порты для дополнительного вакуумного оборудования (датчики давления, насосы или клапаны для форвакуумной откачки), сильфоны, пикап-электроды, а также специальные плавные переходы с эллипса на круглые отверстия диаметром 46 мм. На концах камеры располагаются фланцевые разъемные соединения типа Conflat Ду 63, соединения вакуумной камеры выполнены аргонно-дуговой сваркой. Для компенсации погрешностей изготовления камер, а также компенсации температурного удлинения камер, вызванного нагревом, применены сварные сильфонные узлы (**Рисунок 3.2.2.3**).



**Рисунок 3.2.2.3.** Вакуумная камера одного гирдера поворотной секции (слева). Подсоединение патрубка откачки (видны продольные пазы откачки) и датчик положения пучка (справа).

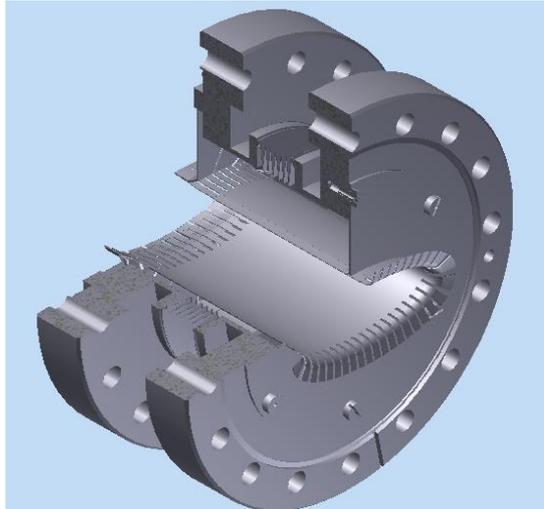
Большинство камер в прямолинейных промежутках имеют эллиптическое сечение  $62 \times 22 \text{ мм}^2$ , с молекулярной проводимостью  $4 \text{ л} \cdot \text{м}/\text{с}$ . Толщина стенки камеры 1 мм.

Вакуумная камера впускных/выпускных VUMP-магнитов имеет форму эллипса с внутренней апертурой  $60.3 \times 21 \text{ мм}^2$ . Толщина стенки 0.5 мм, а для механической прочности на камере припаиваются высокотемпературным ( $\approx 980 \text{ }^\circ\text{C}$ ) медно-оловянистым припоем  $\text{CuSn}_{10}$  ребра жесткости из нержавеющей стали 316LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм.

Камеры магнитов-септумов состоят из двух частей, основной камеры, в которой циркулирует пучок электронов в бустере, и камеры впуска (для впускного септума), через

которую пучок инжектируется в бустер, или камеры выпуска (выпускной септум), через которую пучок выпускается в направлении основного кольца СКИФ.

Апертура основных камер впускного и выпускного септумов аналогична апертуре дипольного магнита. Камера впуска имеет диаметр 28 мм (толщина стенки 0.4 мм), в то время как камера выпуска, благодаря более малому размеру пучка электронов, эллипс  $17 \times 15 \text{ мм}^2$  (с толщиной стенки 0.3 мм). С целью сохранения гладкости камеры и уменьшения импеданса, сильфоны в промежутках впуска/выпуска снабжены ВЧ-контактами, изготовленными из нержавеющей стали 316 LN (**Рисунок 3.2.2.4**).



**Рисунок 3.2.2.4.** Сильфонный узел бустерного синхротрона СКИФ с апертурой  $62 \times 22 \text{ мм}^2$  с высокочастотными контактами, замыкающими токи изображения пучка.

Также для обеспечения разрыва замкнутого витка в промежутке впуска установлена керамическая камера диаметром 95 мм.

Вакуумные камеры диагностического промежутка, изготовленные из трубы, из нержавеющей стали марки 316 L, имеют апертуру  $\text{Ø}63.5$  с толщиной стенки 1.6 мм.

Пикап-электроды в поворотных секциях имеют апертуру аналогичную дипольной вакуумной камере, в прямолинейных промежутках- эллипс  $62 \times 22 \text{ мм}^2$ .

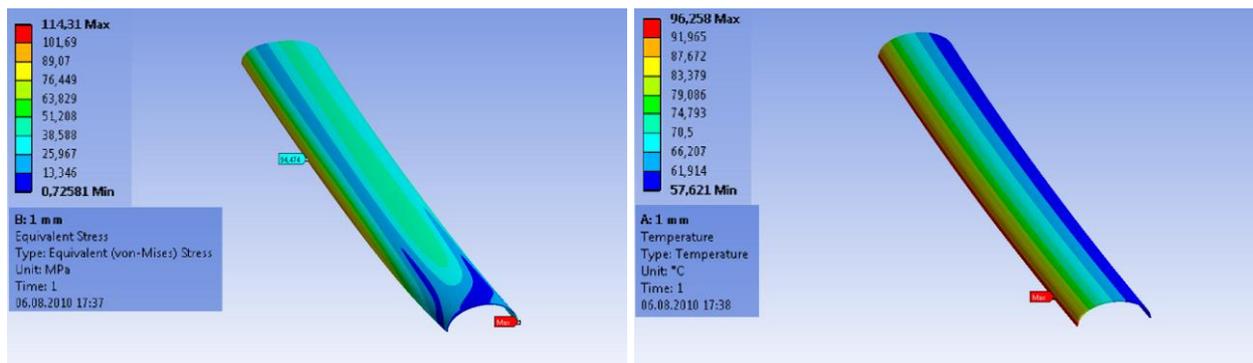
Синхротронное излучение, помимо фотонно-стимулированной десорбции молекул остаточных газов со стенок вакуумной камеры, приводит также к возникновению механических напряжений в вакуумной камере из-за неравномерности нагрева. Из-за малой мощности СИ (максимальная погонная мощность составляет 42 Вт/м в камере поворотных магнитов VD магнитах, в магнитах BF бэта величина в 6 раз меньше) в специальных приемниках излучения нет необходимости. Однако такой мощности может оказаться достаточно для деформации вакуумной камеры при недостаточной толщине стенки.

В тоже время толщина стенок вакуумных камер должна быть как можно меньше, чтобы минимизировать влияние вихревых токов, возникающих при изменении магнитного потока в процессе ускорения электронов. Величина этих токов пропорциональна толщине стенки камеры и удельной проводимости материала, из которого изготовлена камера.

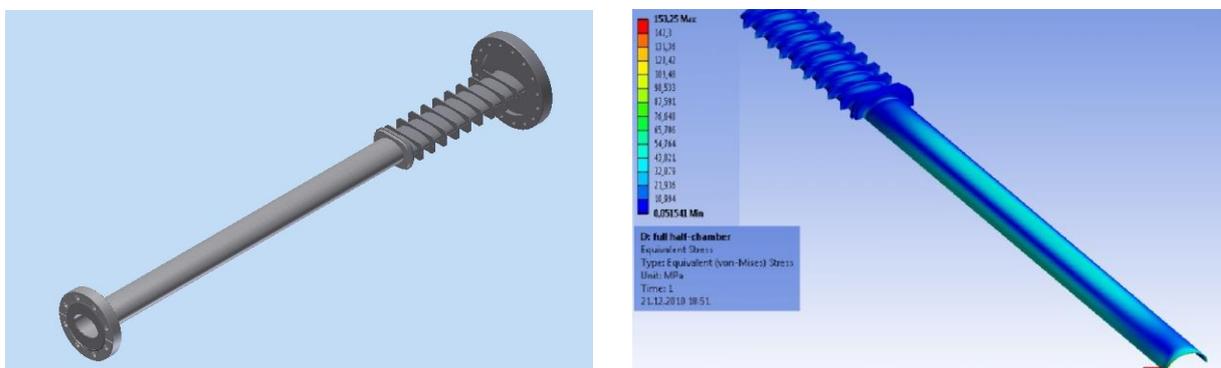
Для надежной работы, при воздействии атмосферного давления, достаточно изготавливать вакуумные камеры дипольных магнитов с толщиной стенки 0.7 мм. Однако, расчеты показали, что такая толщина не гарантирует устойчивость камеры к нагрузкам, вызванным неравномерным нагревом под действием СИ. При плотности мощности СИ, равной 42 Вт/м, стресс, испытываемый камерой, составляет 154 МПа при допустимых значениях  $\leq 180\div 190$  МПа для нержавеющей сталей.

Для достижения необходимой механической прочности было предложено увеличить толщину вакуумной камеры диполей до 1 мм. Кроме того, дополнительным фактором, в пользу принятия такого решения, явилось то обстоятельство, что производитель обеспечивал лучшую равномерность толщины стенки камеры по ее сечению. На **Рисунке 3.2.2.5** представлены расчеты напряжений и температуры нагрева вакуумной камеры из-за СИ по сечению камеры дипольного магнита с толщиной стенки 1 мм.

В результате воздействия атмосферного давления на камеру, находящуюся под вакуумом, в стенках камеры возникают механические напряжения, величина которых достигает значения 50 МПа. Нагрев узкой полоски камеры ( $\approx 1$ мм), под действием СИ, приводит к увеличению механических напряжений вдвое, до 114.5 МПа. При этом видно, что вакуумная камера дипольного магнита толщиной 1 мм имеет надежный запас по прочности.



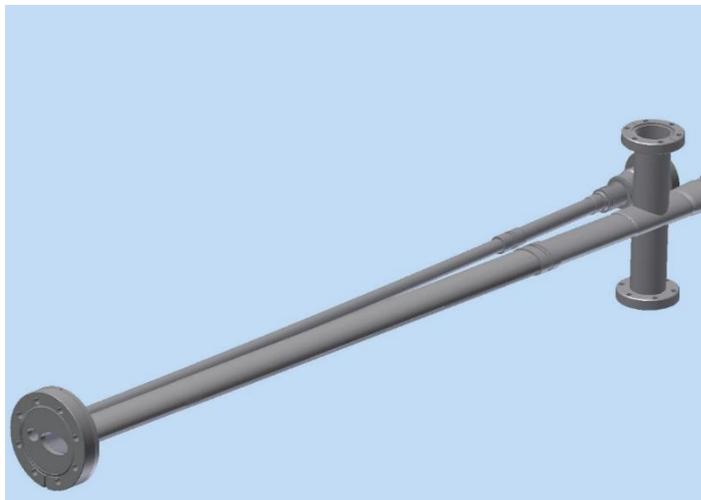
**Рисунок 3.2.2.5.** Слева – максимальные напряжения (МПа), справа – температуры (°С) возникающие в вакуумной камере под действием СИ, по сечению камеры толщиной 1 мм.



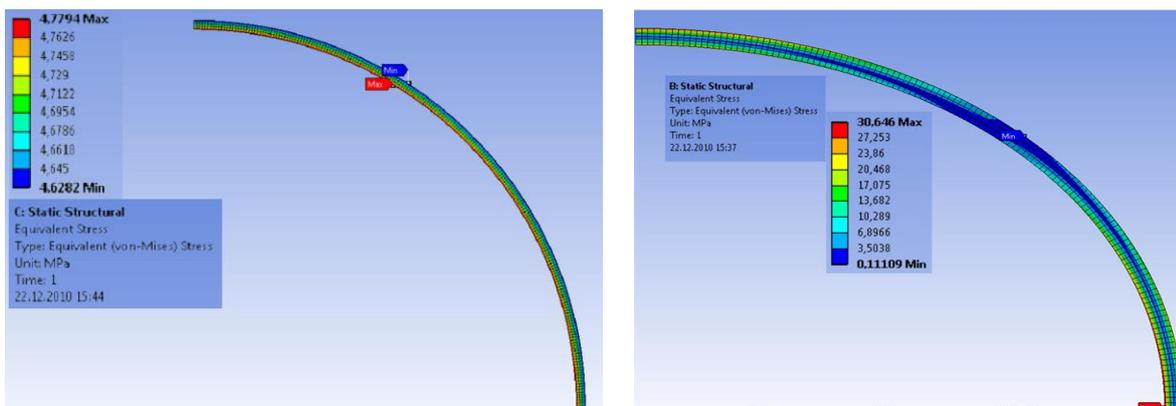
**Рисунок 3.2.2.6.** Вакуумная камера импульсного BUMF-магнита (слева). Распределение напряжений (МПа) в камере из-за СИ (справа).

Наиболее сильно эффект вихревых токов, индуцированных в стенках камеры, проявляется в вакуумных камерах быстрых «предударных» (BUMP) магнитов (**Рисунок 3.2.2.6**).

Вакуумная камера BUMP-магнита имеет форму эллипса с внутренней апертурой  $60.3 \times 21 \text{ мм}^2$ . Для уменьшения влияния вакуумной камеры на магнитное поле толщина стенки камеры была уменьшена до 0.5 мм, а для механической прочности на камере припаиваются высокотемпературным припоем CuSn<sub>10</sub> ребра жесткости из нержавеющей стали 316 LN толщиной 2 мм на расстоянии 23 мм. Мощность синхротронного излучения линейно падает по мере удаления от источника, поэтому наибольшему нагреву подвергается вакуумная камера первого BUMP-магнита промежутка выпуска. Максимальная мощность СИ для прямолинейной части камеры составляет 15 Вт/м, что соответствует нагрузке около 130 МПа, для камеры с ребрами – 6.4 Вт/м, что соответствует нагрузке около 54 МПа. Такая нагрузка не приводит к появлению остаточных деформаций в камере BUMP-магнита.



**Рисунок 3.2.2.7.** Трехмерная модель вакуумной камеры выпускного септума.



**Рисунок 3.2.2.8.** Слева – механическая нагрузка на камеру канала впуска пучка из-за атмосферного давления; максимальная величина 4.8 МПа. Справа – то же для канала выпуска. Максимальная величина – 30 МПа.

На **Рисунке 3.2.2.7** показана трехмерная модель вакуумной камеры выпускного септума; для впуска камера выглядит аналогично. Погонная мощность СИ для камеры бустера (где циркулирует пучок) мала – 1 Вт/м и не приводит к механическим нагрузкам. В камерах каналов впуска и выпуска есть только нагрузка от атмосферного давления. На **Рисунке 3.2.2.8** показаны максимальные нагрузки, вызванные атмосферным давлением на стенки вакуумной камеры, для впускного и выпускного септумов, соответственно.

Указанные нагрузки не приводят к деформации камеры и можно с уверенностью заключить, что камеры септум-магнитов надежно устойчивы к воздействию атмосферного давления.

Все источники питания вакуумного оборудования и система автоматизации для них располагаются в 19" электрическом шкафу NEMA 12. Каждый шкаф объединяет в себе четыре радиостойки. В каждой радиостойке располагается вакуумное оборудование поворотной секции и следующего по направлению движения пучка прямолинейного промежутка.

Для питания и управления магниторазрядными насосами используются четырехканальные контроллеры, обеспечивающие включение/выключение насосов, а также управление подачей высокого напряжения и измерение тока насоса. Контроллеры подключаются к коммутатору по последовательной связи и далее к управляющему компьютеру по сети Ethernet. Сигналы с датчиков давления обрабатываются соответствующими контроллерами, которые, как и контроллеры насосов, подключены к коммутатору по последовательной связи.

Для управления вакуумными шиберами на бустере используется 4 шасси с программируемыми контроллерами PLC, размещенными в четырех радиостойках. Каждый контроллер обслуживает оборудование одного квадранта бустера и прилегающего по ходу пучка промежутка.

Четыре контроллера бустера и два контроллера, управляющие вакуумным оборудованием каналов транспортировки пучка, объединены в единую систему автоматического управления шиберами. Такое объединение способствует надежной выработки сигналов, разрешающих работу оборудования и инъекцию пучка в случае готовности вакуумной системы бустера. Шасси с вакуумным PLC включает несколько модулей цифрового ввода/вывода для приема сигналов блокировок от источников питания насосов и вакуумных датчиков давления и выдачи управляющих команд на закрытие шиберов. При появлении блокировочных сигналов от контроллеров насосов и измерителей вакуума, прилегающих к данному шиберу, возникающих из-за ухудшения уровня вакуума, контроллер либо отдает команду на закрытие соответствующего шибера, либо выдает сигнал контроллеру, который управляет этим шибером. Кроме того, каждый вакуумный контроллер выдает сигнал о состоянии управляемых им шиберов в систему защиты оборудования, где сигналы о состоянии всех шиберов обрабатываются, и суммарный сигнал подается на систему блокировки пушки линейного ускорителя. Контроллер системы защиты выполняет также функцию диспетчера блокировочных сигналов: он принимает все сигналы, приходящие от различных датчиков и логических устройств, касающиеся обеспечения безопасной работы бустера и его источников питания, и выдает суммарные сигналы, разрешающие работу,

непосредственно на защищаемое оборудование. Важное внимание уделяется обеспечению снижения радиационной нагрузки на оборудование. Система защиты запрещает включение пучка, если не обеспечен режим проводки пучка до одного из трех поглотителей пучка, имеющих на инжекционном комплексе или до впуска в основное кольцо.

Предусмотрено измерение температуры стенок вакуумных камер диполей и импульсных магнитов. Для этого в шасси вакуумных PLC бустера включены температурные измерительные блоки, к которым подсоединены резистивные температурные датчики, прикрепленные к вакуумной камере в местах падения СИ.

### 3.2.3 Вакуумная система накопителя

Предельные параметры накопителя СКИФ во многом будут зависеть от исполнения вакуумной системы. Поэтому особое внимание уделяется подбору материалов для изготовления вакуумных элементов, конструкциям откачных портов и соединительных элементов для минимизации резистивных и геометрических импедансов и т.д. Система откачки должна обеспечивать достаточное разрежение для обеспечения «вакуумного времени» жизни пучка не менее 10 часов при токе пучка 0.4 А.

Частота взаимодействий частиц пучка с молекулами остаточного газа определяется из соотношения

$$f_s = N \cdot \sum_i n_i \sigma_i c = -\frac{\partial N}{\partial t}$$

где  $N$  – число релятивистских частиц,  $n_i$  – плотность  $i$  компоненты молекул остаточного газа,  $\sigma_i$  – сечение взаимодействия с  $i$  – ой компонентой остаточного газа, приводящего к потере частицы пучка,  $c$  – скорость света. Соответственно, «вакуумное» время жизни пучка находится из выражения

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i n_i \sigma_i c.$$

Плотность молекул остаточного газа в зависимости от его давления может быть выражена следующим образом (при  $T=300$  К):

$$n[m^{-3}] = 3.217 \times 10^{13} P[nTorr].$$

Сечения взаимодействия релятивистских частиц с атомами много меньше характерных размеров последних. Поэтому, с достаточной точностью, можно считать, что сечение взаимодействия с молекулой есть алгебраическая сумма сечений взаимодействия с составляющими её атомами:

$$\sigma_i = \sum_j m_{ij} \sigma_j,$$

где  $m_{ij}$  – количество атомов  $j$ -го типа в  $i$ -той компоненте остаточного газа. К процессам взаимодействия частиц пучка с атомами остаточного газа относятся:

- упругое рассеяние на ядре атома,
- тормозное излучение в поле ядра атома,
- тормозное излучение в поле электронов атома,
- упругое рассеяние на электронах атома.

Упругое рассеяние на ядрах приводит к спонтанному изменению угла движения частицы, что, в свою очередь, выражается в раскачке бетатронных колебаний и может привести к потере частиц. Общее сечение данного процесса выражается следующим образом [2]:

$$\sigma_{en} = \frac{4r_e Z^2 \pi \bar{\beta} \beta_0}{\gamma^2 2 \alpha_0^2},$$

где  $r_e$  – классический радиус электрона,  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $Z$  – атомный номер остаточного газа,  $\bar{\beta}$  – среднее по кольцу значение бетатронной функции,  $\beta_0$  – бетатронная функция в точке, где вакуумная камера имеет минимальный поперечный размер  $2a_0$ .

Электроны пучка могут отклоняться электрическим полем ядра или электронов атома остаточного газа и терять энергию на тормозное излучение. Потери энергии могут быть достаточно большими, чтобы вывести электрон из области стабильной фазы в синхротронных колебаниях, что приведет к его потере. Если в точке столкновения дисперсия ненулевая, также могут возбуждаться бетатронные колебания, которые могут привести к потере электрона в результате его взаимодействия со стенками вакуумной камеры. Дифференциальное сечение тормозного излучения в поле ядра с учетом полного экранирования и конфигурации электронных оболочек в рамках модели атома Томаса-Ферми, определяется выражением [3]:

$$\partial\sigma_{nb}(\omega) = 4r_e^2 \alpha Z^2 \frac{\partial\omega}{\omega} \left[ \left(1 + \frac{E^2}{E_0^2} - \frac{2}{3} \frac{E}{E_0}\right) \ln \left(183 \cdot Z^{-\frac{1}{3}}\right) + \frac{1}{9} \frac{E}{E_0} \right].$$

Сечение тормозного излучения в поле электронов атома [4]:

$$\partial\sigma_{eb}(\omega) = r_e^2 \alpha Z \frac{\partial\omega}{\omega} \left[ \left(1 + \frac{E^2}{E_0^2}\right) \left(29.1 - \frac{8}{3} \ln Z\right) - \frac{2}{3} \frac{E}{E_0} \left(28.4 - \frac{8}{3} \ln Z\right) \right].$$

где  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры,  $E_0$ ,  $E$  – начальная и конечная кинетические энергии релятивистского электрона,  $\omega = E_0 - E$  – энергия излученного фотона. Интегрирование в области энергий фотона  $\Delta E_{max} < \omega < E_0$ , с учетом  $\Delta E_{max} \ll E_0$ , где  $\Delta E_{max}$  – максимальное допустимое энергетическое отклонение (энергетический акцептанс), дает полные сечения тормозного излучения, приводящие к потере релятивистского электрона:

$$\sigma_{nb} = 4r_e^2 \alpha Z^2 \left[ \left(\frac{4}{3} \ln \frac{1}{\varepsilon_{max}} - \frac{5}{6}\right) \ln \left(183 \cdot Z^{-\frac{1}{3}}\right) + \frac{1}{9} \left(\ln \frac{1}{\varepsilon_{max}} - 1\right) \right].$$

$$\sigma_{eb} = \frac{8}{3} r_e^2 \alpha Z \left[ 4 \ln \left(39.7 \cdot Z^{-\frac{1}{3}}\right) \ln \frac{1}{\varepsilon_{max}} - \ln \left(41.5 \cdot Z^{-\frac{1}{3}}\right) \right].$$

где  $\varepsilon_{max} = \Delta E_{max}/E$  – максимальное относительное энергетическое отклонение.

Релятивистские электроны могут терять энергию при упругом взаимодействии с электронами атома, что приводит к ионизации атома с выбиванием  $\delta$ -электронов. Аналогично другим процессам, электроны пучка будут теряться, если потеря энергии превышает энергетический акцептанс. Сечение упругого рассеяния на электронах с потерей энергии дается выражением [5]:

$$\sigma_{es} = \frac{2\pi r_e^2 Z}{\gamma} \frac{1}{\varepsilon_{max}}.$$

Отметим, что сечения взаимодействия с ядрами пропорциональны  $Z^2$  и, поэтому, значительно превышают сечения взаимодействия с электронами уже при  $Z > 2$ .

Общее время жизни может быть оценено с учетом времен, определяемых каждым процессом, следующим образом:

$$\frac{1}{\tau_{gas}} = \frac{1}{\tau_{ns}} + \frac{1}{\tau_{nb}} + \frac{1}{\tau_{eb}} + \frac{1}{\tau_{es}}.$$

Типичная величина давления в вакуумных камерах современных накопительных колец (после надлежащей подготовки и тренировки внутренней поверхности под действием СИ) составляет несколько нТорр, а состав газовой смеси близок к следующему: 80%Н<sub>2</sub> + 20%СО. Но в терминах вклада в вакуумное время жизни Н<sub>2</sub> и СО оказываются в обратных весовых категориях, поскольку сечение взаимодействия с СО примерно в 30 раз больше чем с Н<sub>2</sub>. Далее, в данных расчетах, будут учитываться потери почка при взаимодействии только с молекулами СО. Основные параметры для вычислений вакуумного времени жизни для проекта основного кольца источника СИ ЦКП «СКИФ» представлены в **Таблице 3.2.3.1**, а результаты оценок представлены в **Таблице 3.2.3.2**.

**Таблица 3.2.3.1.** Основные параметры для оценок времени жизни.

Энергия	3 ГэВ
Давление остаточного газа	1 нТорр
Газовый состав	СО 100%
Энергетический акцептанс	2.6%
Среднее значение $\beta_y$	6 м
Макс.значение $\beta_y$ в местах с минимальной апертурой	6 м
Мин.вертикальная апертура (вакуумная камера ондулятора)	6 мм

**Таблица 3.2.3.2.** Время жизни для различных процессов.

Упругое рассеяние на ядрах, $\tau_{ns}$	50 час
Тормозное излучение в поле ядер, $\tau_{nb}$	67 час
Тормозное излучение в поле электронов, $\tau_{eb}$	325 час
Упругое рассеяние на электронах $\tau_{es}$	6326 час
Общее, $\tau_{gas}$	26 час

Таким образом, для обеспечения времени жизни пучка 10 часов, среднее давление остаточных газов (в СО эквиваленте) должно быть не более 2.5 нТорр ( $3.3 \cdot 10^{-7}$  Па).

В связи с развитием и широким распространением в последнее время малогабаритных комбинированных вакуумных насосов (ионно-геттерный + геттерный) [6] и методов нанесения нераспыляемых геттеров внутри мало-апертурных камер [7-12], в накопителе СКИФ принята гибридная система вакуумной откачки: сосредоточенные комбинированные насосы в арках и распределенные насосы на основе геттерных пленок системы TiZrV в прямолинейных промежутках. Геттерные пленки будут также применяться в ставных

устройствах, работающих при комнатной температуре. В вставных устройствах с сверхпроводящими магнитными элементами вакуумная камера пучка автоматически будет играть роль эффективного распределенного криогенного насоса.

Вакуумные камеры с нанесенной геттерной пленкой обеспечивают, после активации (прогрева), необходимый уровень разрежения и не требуют какой-либо тренировки в динамическом режиме (с пучком). В этом их безусловное преимущество. В арках накопителя камера проходит внутри множества магнита-оптических элементов с минимальным зазором с полюсами магнитов. Поэтому в арках принята концепция непрогреваемой вакуумной камеры, не требующей дополнительного зазора для прогрева *in-situ* или разборки магнитных элементов для проведения прогрева. Такой подход дает дополнительное преимущество: снижение необходимого числа механических компенсаторов в 3-4 раза по сравнению с прогреваемой системой. На начальной стадии проектирования, когда невозможно предугадать точное расположение сосредоточенных насосов, их необходимое количество (или среднее расстояние между насосами) в протяженной пучковой камере можно определить с достаточной точностью применяя диффузионную модель Кнудсена для вычисления профиля давления остаточного газа. Действительно, при равномерном расположении насосов можно получить тривиальное решение для среднего давления:

$$\hat{P} = \frac{qL^2}{12u} + qLS = \frac{qL^2}{12u(1-k)},$$

где  $q$  [Па·м<sup>3</sup>/м·с] – равномерно распределенная газовая нагрузка (десорбция молекул со стенок камеры),  $L$ [м] – расстояние между насосами,  $S$ [м<sup>3</sup>/с] – быстрота откачки насоса,  $u$ [м<sup>4</sup>/с] – молекулярная проводимость камеры единичной длины,  $k = P_s/\hat{P}$  – коэффициент использования насосов (обычно 0.2...0.5),  $P_s$  – давление на входе насоса.

Интересно отметить, что варьирование расстоянием между насосами от  $0.5L$  до  $1.5L$ , при сохранении общего количества насосов, дает вариацию среднего давления в диапазоне 1...1.6 от среднего давления при эквидистантном расположении насосов. Эффективность расположения насосов можно учесть, введя соответствующий коэффициент  $g$ :

$$\hat{P} = g \frac{qL^2}{12u(1-k)}.$$

Внутренняя поверхность вакуумных камер является непрерывным и, чаще всего, определяющим источником газовой нагрузки на протяжении всего периода эксплуатации сверхвысоковакуумных установок. В пучковой камере, например, диаметром 3 см количество молекул, химически связанных и адсорбированных на внутренней поверхности, в  $3E8 \div 3E9$  раз больше чем в объеме при плотности  $10^{12}$  м<sup>-3</sup> ( $3 \cdot 10^{-7}$  Па). Таким образом, любое воздействие на поверхность, вызывающее испарения (десорбцию) молекул может привести к значительным нагрузкам на систему откачки. В источниках СИ практически вся поверхность вакуумной системы подвержена воздействию интенсивного потока фотонов с энергиями значительно превышающими энергию химических связей. Сечение взаимодействия фотонов СИ с молекулами на  $2 \div 3$  порядка меньше чем сечение неупругих электрон-молекулярных взаимодействий при энергиях электронов  $20 \div 1000$  эВ. Поэтому десорбция газа под действием

синхротронного излучения происходит в два этапа: фотоны выбивают с облучаемой поверхности фотоэлектроны (на некоторой глубине от поверхности), которые, в свою очередь, могут привести к десорбции молекул газа с поверхности вакуумной камеры, причем как при вылете с поверхности, так и при попадании на нее. Кроме того, часть фотонов отражается и рассеивается по всей поверхности вакуумной камеры. В результате, даже в лабораторных экспериментах по изучению десорбции под действием СИ, так или иначе, участвует вся поверхность вакуумной камеры. Это значительно затрудняет интерпретацию и сравнение полученных данных. Однако накопленный опыт позволяет выявить интегральные параметры этого сложного явления, необходимые для расчета и проектирования ускорителей.

Основной характеристикой десорбции под действием фотонов является среднее число молекул десорбированных одним фотоном  $\eta$  [молекула/фотон] – коэффициент фото-стимулированной десорбции. Тогда поток молекул со стенок можно записать как:

$$q = \eta \dot{\Gamma} / K.$$

где  $\dot{\Gamma}$  – поток фотонов [фотон/м<sup>2</sup>/с],  $K = 2.4 \cdot 10^{20}$  – количество молекул в кубометре при комнатной температуре и давлении 1 Па.

Расчет показывает, что при среднем расстоянии между насосами 1 м, диаметре вакуумной камеры 27 мм, факторе  $g = 1.6$ , коэффициенте  $k = 0.25$ , среднем потоке фотонов  $2 \cdot 10^{18}$  фотон/(м<sup>2</sup>·с) и коэффициенте десорбции  $10^{-6}$ , среднее давление СО будет на требуемом уровне  $3 \cdot 10^{-7}$  Па.

Известно, что начальные значения фото-десорбции могут быть на уровне 0.01, т.е. значительно превышать требуемое значение  $10^{-6}$ . Однако интенсивность стимулированной десорбции уменьшается по мере накопления (тренировки) фотонной дозы по закону [13]:

$$\eta = \eta_0 [1 + (\Gamma / \Gamma_{1/2})^\varepsilon]^{-1},$$

где  $\eta_0$  [молекула/фотон] – начальное значение коэффициента десорбции,  $\Gamma$  – фотонная доза [фотон/м],  $\Gamma_{1/2}$  – фотонная доза [фотон/м], при которой коэффициент десорбции уменьшается в два раза от начального значения. При фотонных дозах  $\Gamma > \Gamma_{1/2}$  и коэффициент десорбции убывает по степенному закону с показателем степени  $\varepsilon$ . По многочисленным экспериментальным данным [14] показатель степени  $\varepsilon$  изменяется в пределах  $0.6 \div 1.0$ . Причем большим значениям  $\varepsilon$  соответствуют большие значения  $\eta_0$ . Начальное значение коэффициента десорбции сильно зависит от материала вакуумной камеры, степени очистки, предыстории (условий и длительности хранения камер до вакуумирования) и варьируется в пределах  $0.01 \div 0.1$  Н<sub>2</sub> и  $0.003 \div 0.03$  для СО в непрогретых системах. Как правило, для получения низких значений  $\eta_0$  проводят химическую очистку в ультразвуковых ваннах и предварительный прогрев вакуумных камер непосредственно перед установкой в непрогретую вакуумную систему. Для прогретых систем  $\eta_0$  меняется в пределах  $0.003 \div 0.01$  для Н<sub>2</sub> и  $0.0003 \div 0.003$  для СО. Значение дозы  $\Gamma_{1/2}$  изменяется в широких пределах  $10^{19} \div 3 \cdot 10^{21}$  [фотон/м]. Здесь также существует достаточно строгая корреляция с  $\eta_0$ : малым значениям  $\eta_0$  соответствуют большие значения  $\Gamma_{1/2}$ . Важно отметить, что соотношения между  $\eta_0$ ,  $\varepsilon$  и  $\Gamma_{1/2}$

устроены так, что значение  $\eta(\Gamma)$  при дозах  $\Gamma > 10^{24}$  [фотон/м] меняется в весьма малых пределах. Т.е. практически не зависит ни от начальных условий или от материала вакуумной камеры.

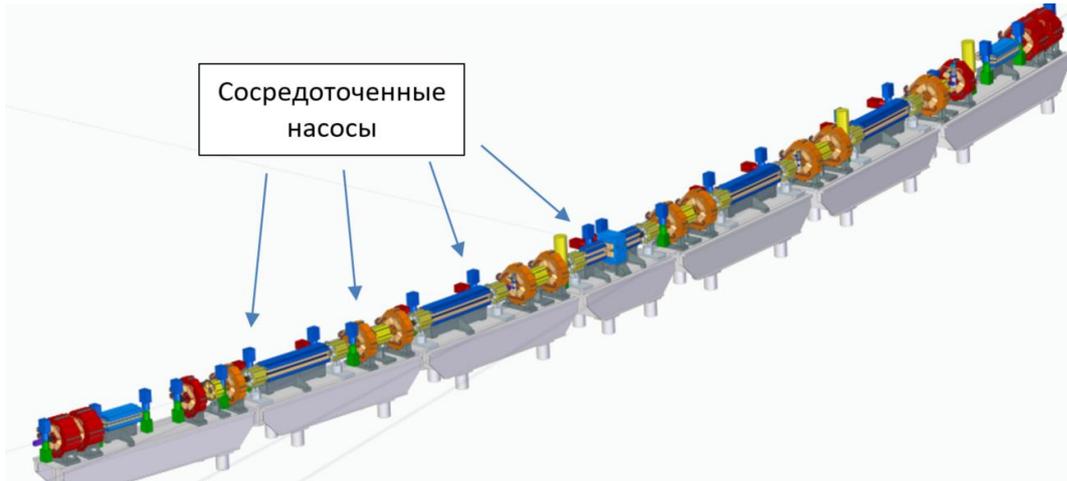
Интенсивность облучения вакуумной камеры накопителя СКИФ неоднородно, но следует учесть, что даже при наихудшем значении  $\varepsilon = 2/3$ , при больших дозах облучения поток десорбции слабо зависит от потока фотонов:  $Q \propto \Gamma^{-2/3} \cdot \dot{\Gamma} \propto \dot{\Gamma}^{1/3}$ . Это означает, что для вычисления среднего динамического давления, приближение равномерного распределения десорбции молекул по кольцу под действием СИ, вполне оправдано.

Анализ многочисленных экспериментальных данных, а также динамики давления на ВЭПП-3 при накоплении фотонной дозы до  $3 \cdot 10^{25}$  фотон/м [15], позволяет заключить, что при практически наихудшем значении  $\varepsilon = 2/3$ , требуемая степень тренировки (т.е.  $\eta = 10^{-6}$ ) будет достигнута при накоплении фотонной дозы  $1.3 \cdot 10^{25}$  фотон/м. Для накопления такой дозы в СКИФ требуется 2.5 месяца при номинальном потоке фотонов  $2 \cdot 10^{18}$  фотон/м/с. Очевидно, что в начале тренировки невозможно работать с номинальным током из-за интенсивной газовой нагрузки (короткого времени жизни). Для расчета реального времени, необходимого для тренировки накопителя СКИФ, введем ограничение на произведение  $I \cdot P \leq 4.4 \cdot 10^{-7}$  Па·А, что соответствует времени жизни пучка 3 часа при номинальном токе 0.4А. Применение данного критерия совместно с вышеприведенными соотношениями позволяет аналитически вычислить время необходимое для тренировки пучковой камеры накопителя СКИФ, которое составляет около 3 месяцев. В **Таблице 3.2.3.3** приведены параметры для вычисления времени тренировки.

**Таблица 3.2.3.3.** Параметры для расчета времени тренировки вакуумной системы СКИФ.

Энергия электронов, E	3 ГэВ
Ток пучка	0.4 А
Средний поток фотонов при 0.4 А	$2 \cdot 10^{18}$ ф/с/м
Внутренний диаметр вакуумной камеры пучка	27 мм
Среднее расстояние между насосами	1 м
Быстрота откачки насосов по СО	120 л/с
$g$ - factor	1.6
$k$ - factor	0.25
Начальное/конечное значение коэффициента десорбции	$10^{-2} / 10^{-6}$
Показатель степени $\varepsilon$	2/3
Необходимая доза облучения	$1.3 \cdot 10^{25}$ ф/м
Ограничение $C = P \cdot I$ (в течение тренировки)	$4.4 \cdot 10^{-7}$ Па·А

Накопитель СКИФ поделен на 16 супер-периодов, каждый из которых содержит по 24 комбинированных насоса. Схема супер-периода накопителя показана на **Рисунке 3.2.3.1**.



**Рисунок 3.2.3.1.** Размещение сосредоточенных насосов в суперпериоде СКИФ.

Комбинированные насосы расположены в среднем на расстоянии 1м друг от друга. Быстрота откачки насоса по СО не менее 120 л/с.

Как уже было сказано, особое внимание уделяется подбору материалов для изготовления вакуумных элементов, конструкциям откачных портов и соединительных элементов для минимизации резистивных и геометрических импедансов. Ступеньки и щели во фланцевых соединениях и сильфонных узлах вакуумных камер, вследствие их большого количества, могут быть значительными источниками импедансов. Из этих соображений в качестве фланцевого вакуумного соединения были выбраны фланцы конструкции *Matsumoto-Ohtsuka* (фланцы МО-типа) [16, 17]. Данное соединение успешно используется на коллайдере SuperKEKB в Японии. Схема фланцевых соединений вакуумных камер SuperKEKB показана на **Рисунке 3.2.3.2** [18]. Исходя из схемы, видны основные преимущества данного типа соединений по сравнению с соединениями типа ConFlat: отсутствие щелей и ступенек, высокая проводимость по току между фланцем и уплотнением с внутренней стороны вакуумной камеры.

В качестве материала фланцев может использоваться алюминиевый сплав или нержавеющая сталь, материал уплотнения – медь или алюминиевый сплав. Для датчиков положения пучка возможен вариант применения титана в качестве материала фланцев. В случае необходимости прогрева фланцевого соединения материал крепежа должен быть согласован с материалом фланцев по коэффициенту температурного расширения (КТР). В накопителе СКИФ применяются алюминиевые вакуумные камеры. Фланцы камер сделаны из алюминиевого сплава. Использование фланцев из нержавеющей стали для сварки с камерой потребует применения биметалла: нержавеющая сталь – алюминий, что экономически не выгодно. Крепеж из алюминиевого сплава требует более деликатного обращения (обязательное применение динамометрических ключей при затяжке) чем стандартный крепеж из нержавеющей стали. Поэтому для монтажа вакуумных камер был выбран стандартный крепеж. Но для компенсации разности КТР крепежа и фланцев были введены кольца из титана со стороны фланцев из алюминиевого сплава (см. **Рисунок 3.2.3.3**). В этом случае толщина фланца была уменьшена, чтобы с учетом кольца, общая толщина значительно не увеличивалась. Применение титановых колец позволяет использовать такие комбинации

материалов фланцев как: алюминий – алюминий, нержавеющая сталь – алюминий, титан – алюминий. Оценить толщину титанового кольца можно по формуле:

$$H_{Ti} = H_{Al} \frac{\alpha_{S.S.} - \alpha_{Al}}{\alpha_{Ti} - \alpha_{S.S.}}$$

где  $H$  – толщина и  $\alpha$  – КТР соответствующего материала, S.S. – нержавеющая сталь.

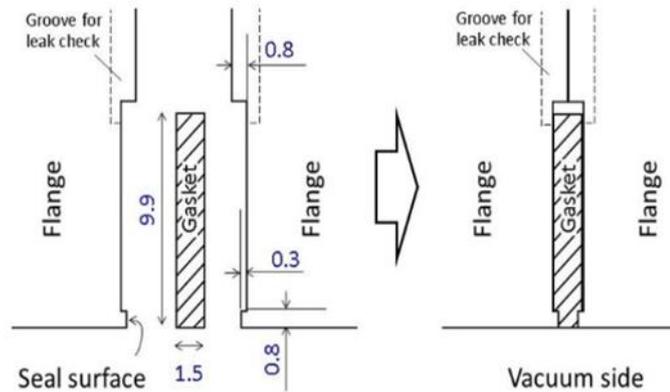


Рисунок 3.2.3.2. Схема фланцевого соединения конструкции *Matsumoto–Ohtsuka*.

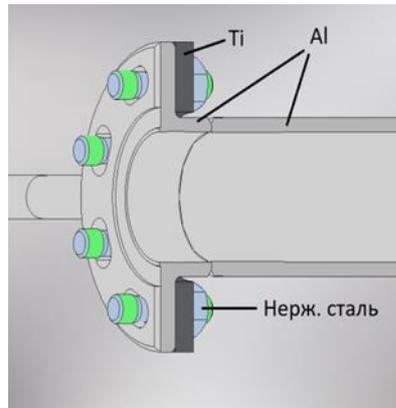
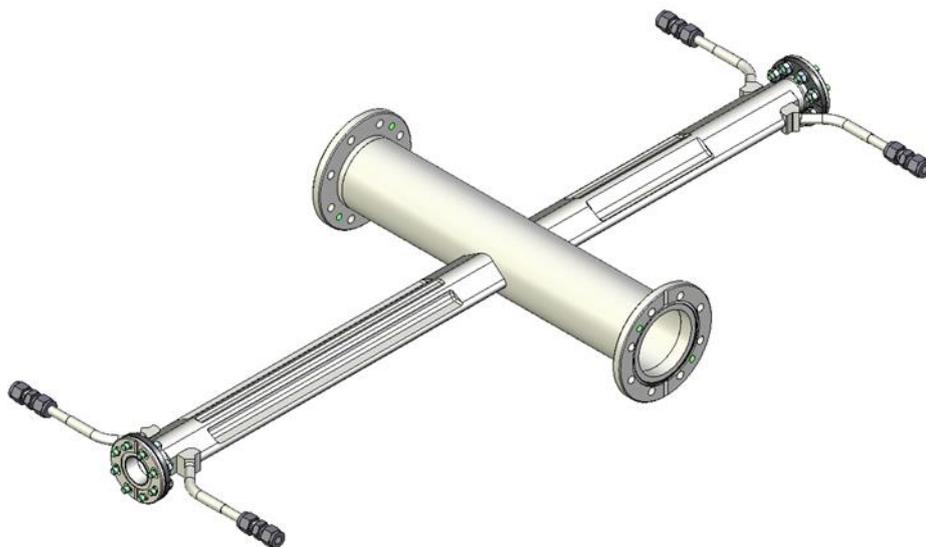


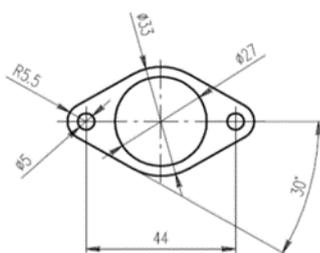
Рисунок 3.2.3.3. Конструкция фланцевого соединения вакуумной камеры накопителя СКИФ.

На **Рисунке 3.2.3.4** показана вакуумная камера со стандартным откачным портом. Фланцы DN63 откачного порта имеют стандарт ConFlat, но выполнены из алюминиевого сплава. Фланцы имеют стандартный нержавеющий крепеж и, компенсирующее КТР, титановое кольцо. Данная вакуумная камера проходит через квадрупольный и секступольный магниты. К откачным портам подключается вакуумное оборудование: насосы, вакуумметры или анализаторы остаточных газов.

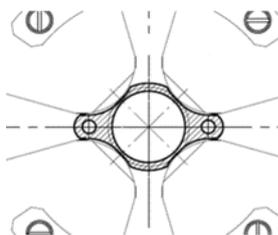


**Рисунок 3.2.3.4.** Вакуумная камера со стандартным откачным портом.

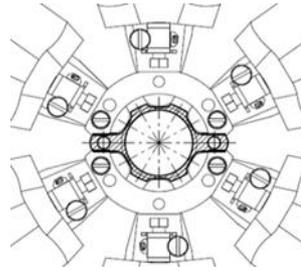
Основной профиль вакуумной камеры показан на **Рисунке 3.2.3.5**. Камера выполнена из алюминиевого профиля, полученного методом экструзии. Камера имеет два канала в горизонтальной плоскости. Один канал используется для водяного охлаждения, второй — может быть использован для прокладки нагревающего кабеля. В магнитных элементах основной профиль вакуумной камеры механически дорабатывается в соответствии с геометрией полюсов магнитных линз (см. **Рисунки 3.2.3.6 и 3.2.3.7**).



**Рисунок 3.2.3.5.** Основной профиль вакуумной камеры.

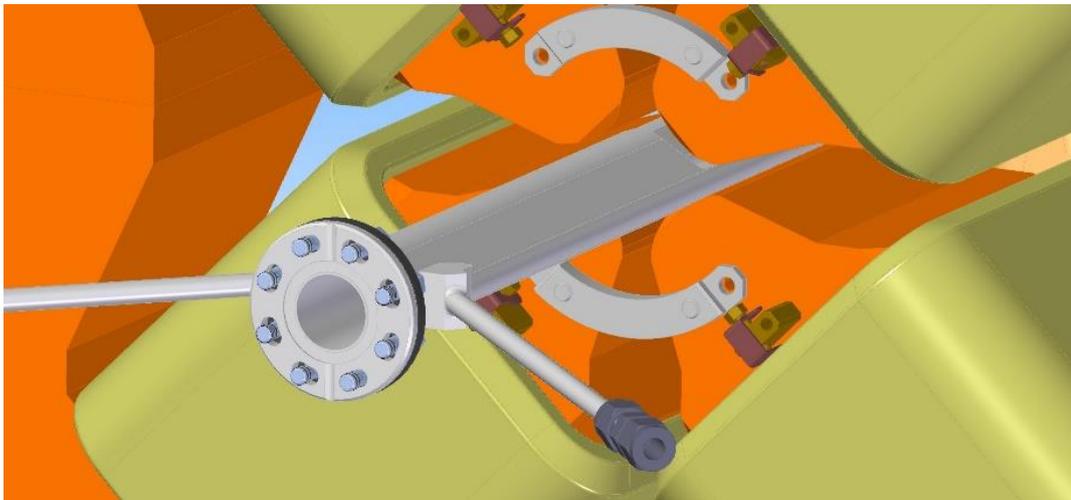


**Рисунок 3.2.3.6.** Профиль вакуумной камеры в квадрупольных магнитах.



**Рисунок 3.2.3.7.** Профиль вакуумной камеры в секступольных магнитах.

Трехмерная модель вакуумной камеры, вставленной в квадрупольную линзу, с фланцевым соединением и патрубками водяного охлаждения показана на **Рисунке 3.2.3.8.**

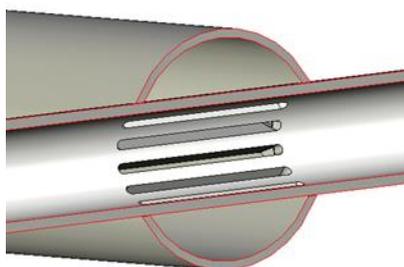


**Рисунок 3.2.3.8.** Трехмерная модель вакуумной камеры в квадрупольном магните.

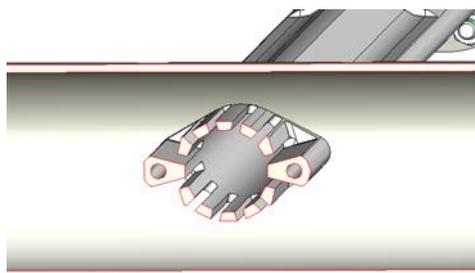
Для поворотных магнитов расстояние между торцом магнита и соседним элементом мало, поэтому было принято решение вывести вакуумные насосы выше и ниже медианной плоскости. Соответствующий участок вакуумной камеры показан на **Рисунке 3.2.3.9.**



**Рисунок 3.2.3.9.** Вакуумная камера с малогабаритными вертикальными портами откачки.



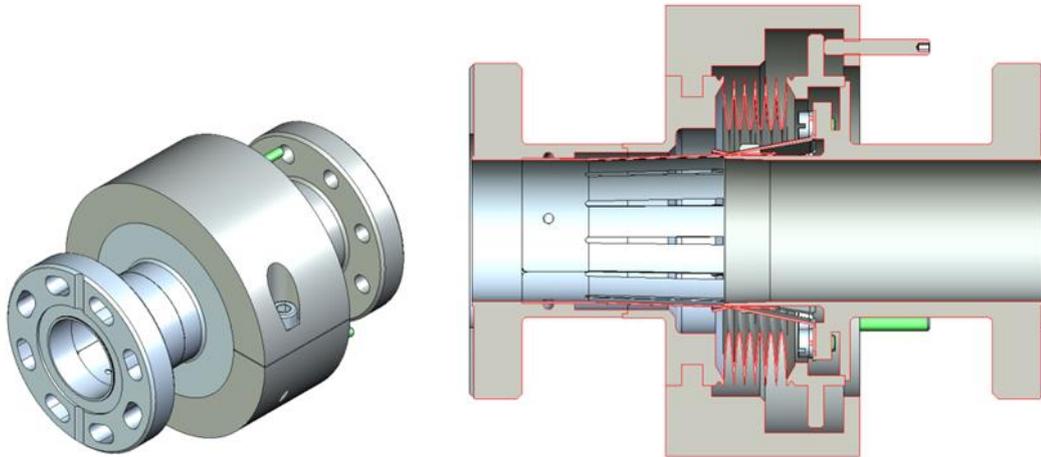
**Рисунок 3.2.3.10.** Продольное сечение вакуумной камеры внутри патрубка откачного порта.



**Рисунок 3.2.3.11.** Поперечное сечение вакуумной камеры внутри патрубка откачного порта.

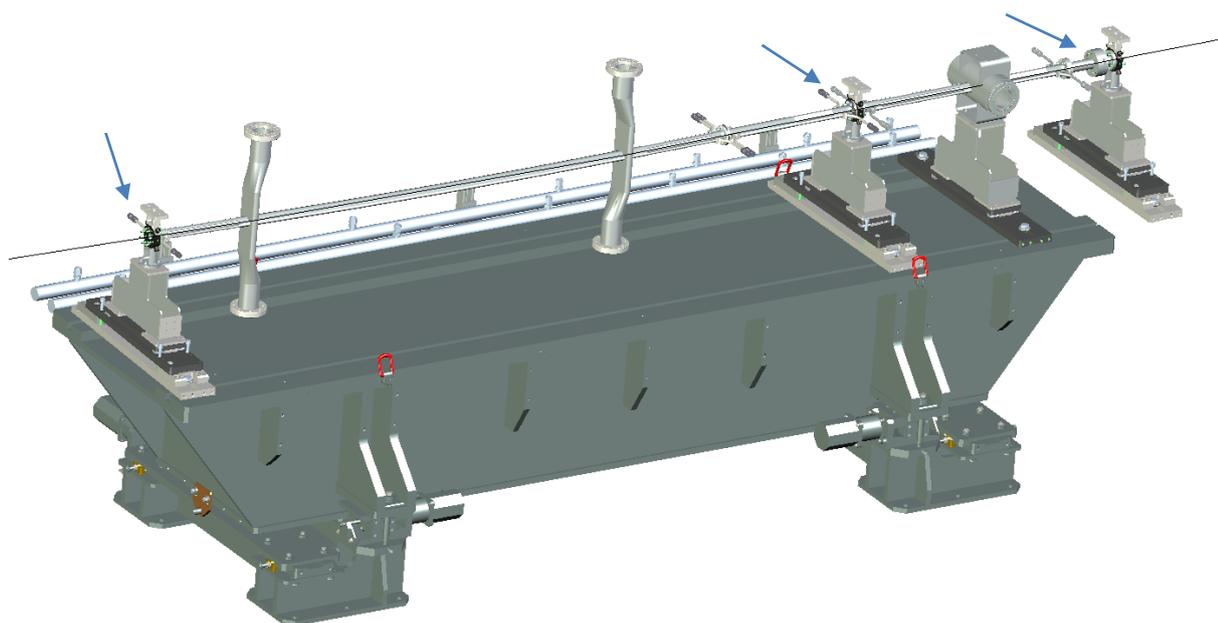
Особое внимание уделяется месту стыковки вакуумной камеры с патрубком откачного порта. Вакуумная камера непрерывно проходит сквозь патрубок с сохранением своего профиля. Внутри патрубка в стенках пучковой камеры сделаны отверстия овальной формы под откачку (см. **Рисунки 3.2.3.10 и 3.2.3.11**). Геометрия отверстий должна минимизировать вносимый импеданс.

Для компенсации температурных расширений, неточностей изготовления, возможности монтажа и выставки вакуумных камер применяются сильфонные узлы с RF контактами (для минимизации вносимого геометрического импеданса). Внешний вид и конструкция сильфонного узла показаны на **Рисунке 3.2.3.12**. В конструкции применяется полосковый подпружиненный скользящий контакт. Для предотвращения выпадения полосок из рабочих мест применяются ограничители продольного и поперечного хода сильфона. Продольный ход составляет  $\pm 5$  мм.



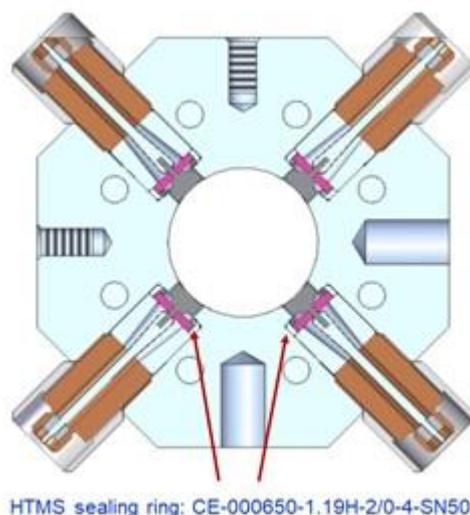
**Рисунок 3.2.3.12.** Внешний вид и продольное сечение сильфонного узла вакуумной системы накопителя СКИФ.

Количество сильфонных узлов в супер-периоде ввиду минимизации импеданса строго ограничено и составляет 2 штуки. Сильфонные узлы также устанавливаются между супер-периодами. Среднее расстояние между узлами составляет 8 м. В пределах данного расстояния установлено несколько камер с откачными портами и несколько датчиков положения пучка (ВРМ) между камерами. Откачные порты и ВРМ монтируются на выставочные опоры, позволяющие произвести точную регулировку поперечного положения установленных на них элементов (см. **Рисунок 3.2.3.13**). После регулировки опоры жестко фиксируются в поперечном направлении, а в продольном имеют свободный ход в пределах нескольких миллиметров. Данная конструкция обеспечивает подвижность в продольном направлении всей собранной вакуумной системы (с откачными портами и ВРМ) как единой цельной камеры в пределах между двумя сильфонными узлами.

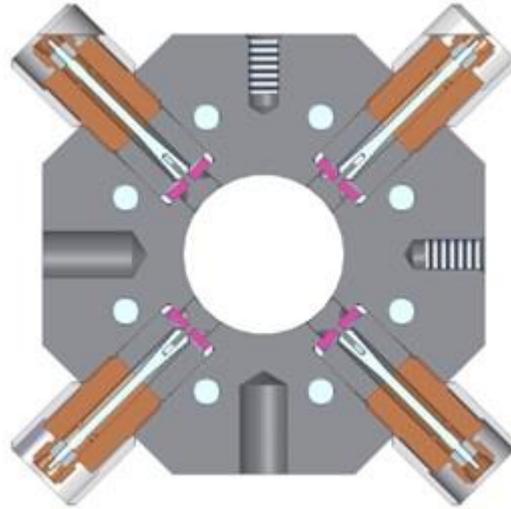


**Рисунок 3.2.3.13.** Внешний вид собранной вакуумной системы одного из гирдеров накопителя СКИФ. Сильфонный узел установлен в правом краю перед ВРМ.

В накопителе СКИФ используется 224 электростатических четырехэлектродных датчиков положения пучка, регистрирующих с высокой точностью поперечные координаты центра распределения заряда пролетающего сгустка электронов.



**Рисунок 3.2.3.14.** Вариант исполнения ВРМ с разборным вакуумным соединением электрода. Указан тип используемого уплотнения.



**Рисунок 3.2.3.15.** Вариант исполнения ВРМ с нераз-борным (паянным) вакуумным соединением электрода.

Датчик ВРМ имеет два варианта конструкции, отличающихся способом вакуумного соединения керамических изоляторов электродов с корпусом датчика. В первом варианте (см. **Рисунок 3.2.3.14**) между изолятором и корпусом используется упругое металлическое уплотнение С-образной формы производства фирмы HTMS [19], корпус ВРМ выполнен из нержавеющей стали (см. **Рисунок 3.2.3.14**). Во втором случае применяется пайка изолятора к корпусу ВРМ (см. **Рисунок 3.2.3.15**), выполненного из титана.

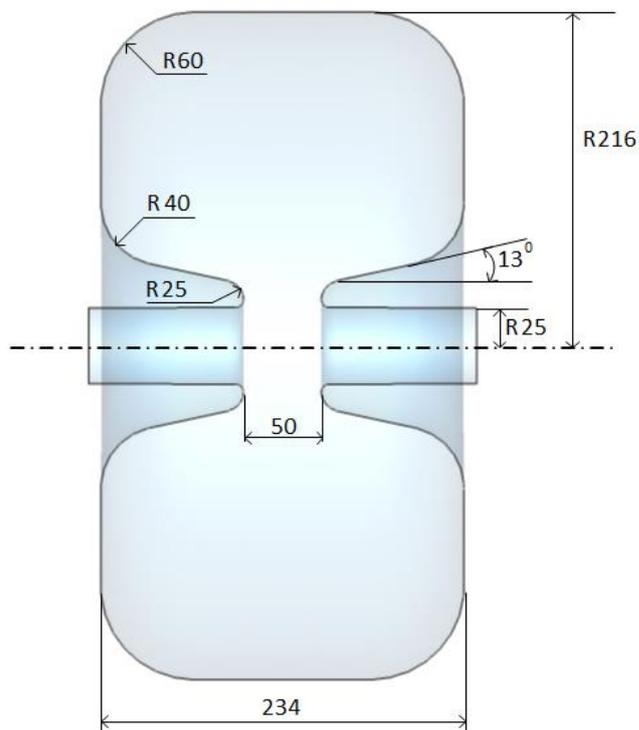
### 3.3 Ускоряющие резонаторы

Ускоряющие системы бустера и накопителя СКИФ работают на одной и той же частоте 357 МГц. Основные компоненты системы (высокочастотные ускоряющие резонаторы с подавлением высших мод и твердотельные ВЧ-генераторы) унифицированы для обеих установок.

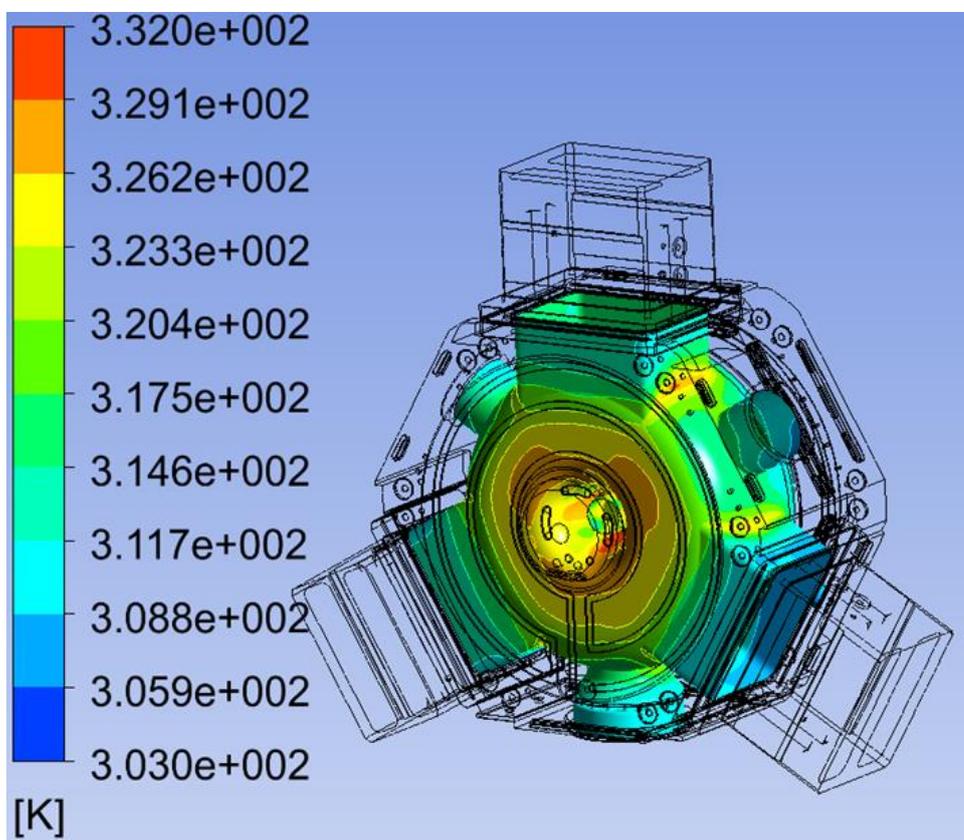
На энергии выпуска резонаторы бустера должны обеспечить ускоряющее напряжение, равное 1.2 МВ. Мощность радиационных потерь на энергии выпуска при среднем токе пучка 30 мА составляет 20.6 кВт. Резонаторы накопителя должны обеспечить ускоряющее напряжение, равное 1.8 МВ. Мощность радиационных потерь на энергии выпуска при среднем токе пучка 400 мА составляет 430 кВт.

Резонаторы имеют омега-образную форму (см. **Рисунок 3.3.1**) и снабжены тремя сдвоенными волноводами с СВЧ поглотителями в оконечной части для демпфирования высших мод (ВМ), возбуждаемых в резонаторах пролетающими сгустками электронов. Внутренняя  $\Omega$ -образная геометрия оптимизирована для того, чтобы, с одной стороны, максимально обеднить спектр высших мод, а с другой – обеспечить приемлемые параметры на основной моде. В получившейся геометрии спектр высших мод существенно прорежен. А шунтовое сопротивление основной моды осталось достаточно высоким 2.55 МОм. Максимальная плотность мощности при напряжении 400 кВ составит 15.7 Вт/см<sup>2</sup>. С учетом

охлаждения, перегрев выглядит как показано на **Рисунке 3.3.2**. Конфигурация резонаторов показана на **Рисунках 3.3.3 и 3.3.4**.



**Рисунок 3.3.1.** Внутренняя геометрия резонатора.



**Рисунок 3.3.2.** Температурная карта резонатора.

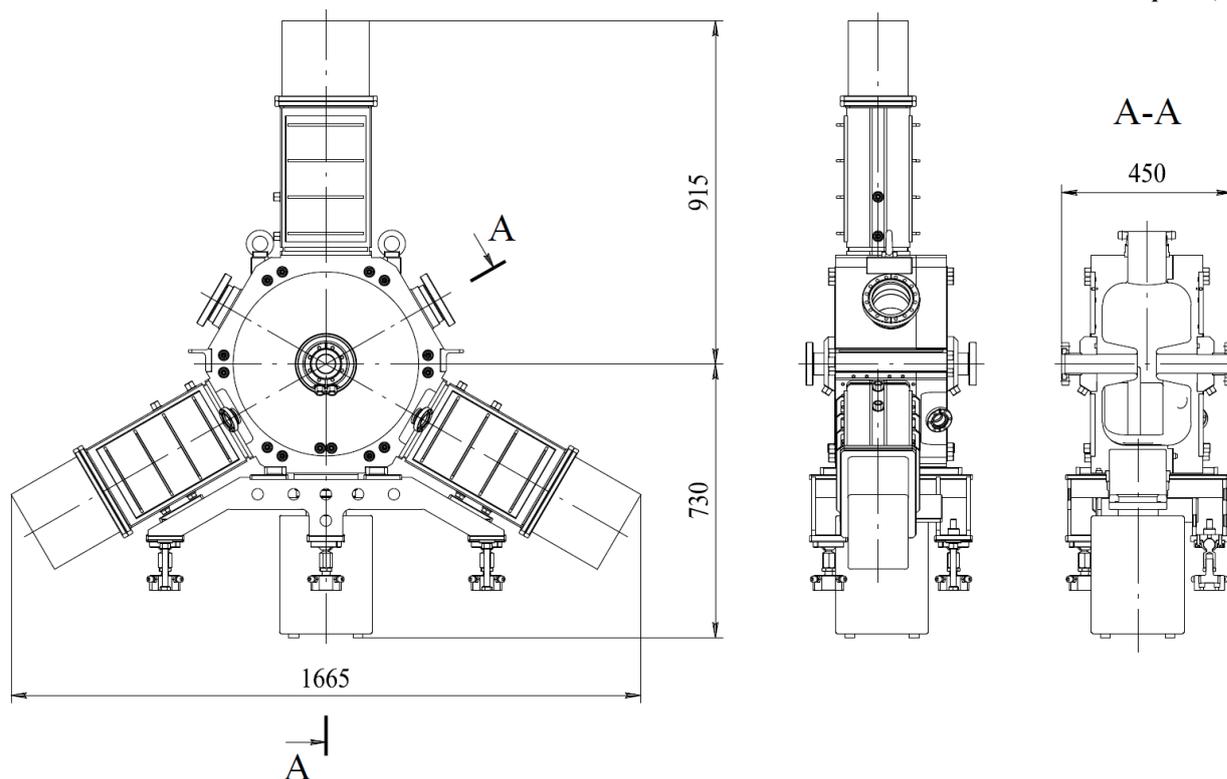


Рисунок 3.3.3. Эскиз резонатора с габаритными размерами.

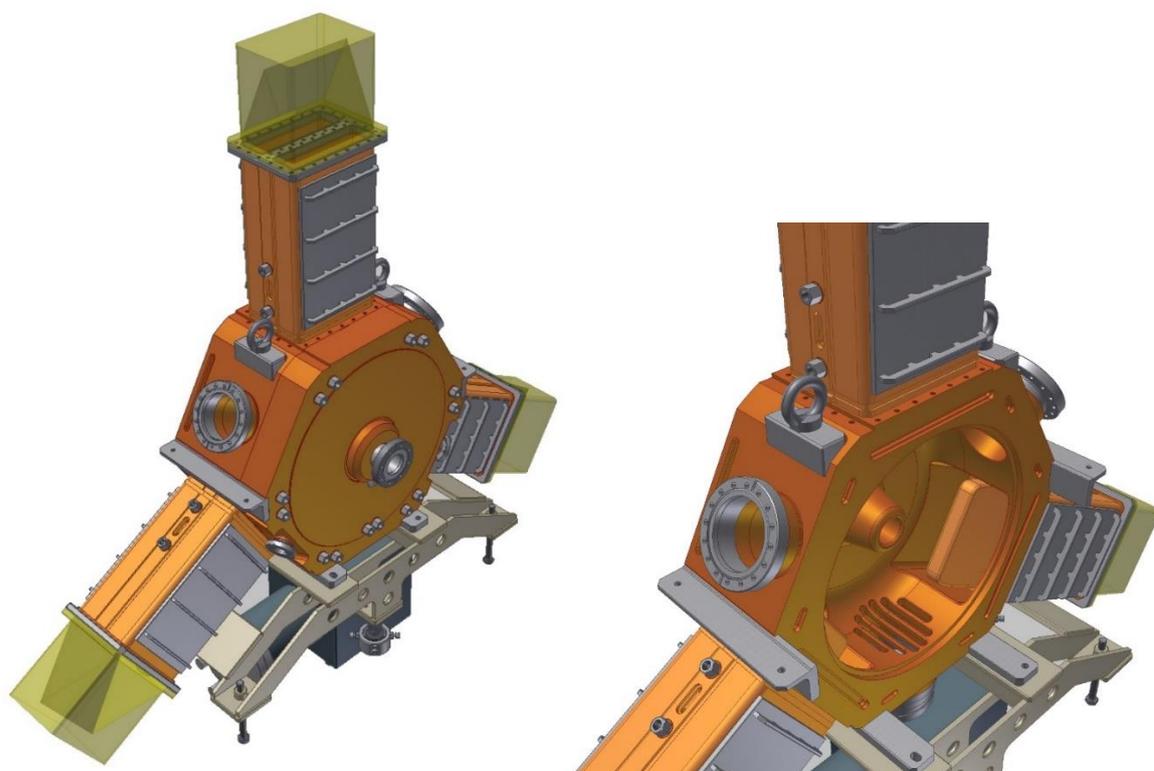


Рисунок 3.3.4. 3D-модель резонатора: слева – резонатор в сборе, справа – без торцевой стенки.

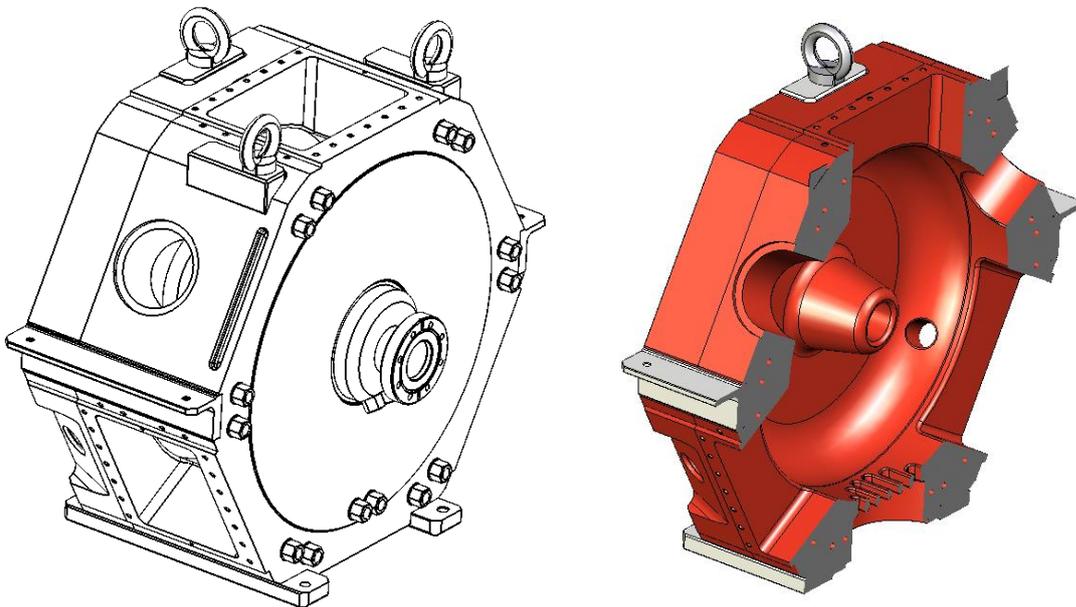
**Таблица 3.3.1.** Параметры резонатора на основной моде.

	Бустер <sup>*)</sup>	Накопитель
Рабочая частота $f_0$ , МГц	357	
Диапазон перестройки частоты $\Delta f$ , МГц	1	
Собственная добротность $0.7Q_0$ 3D-model	17 000	
Характеристическое пролетное сопротивление $R/Q$ , Ом	150	
Шунтовое пролетное сопротивление $R$ , МОм	2.55	
Амплитуда ускоряющего напряжения $V_m$ , кВ	400	360
Мощность потерь в стенках $P$ , кВт	31.4	26
Максимальная плотность мощности потерь $p_{max}$ , Вт/см <sup>2</sup>	15.7	13
Мощность, передаваемая в пучок для компенсации рад. потерь $P_b$ , кВт	6.9	86

\*) – значения напряжения и мощности для резонаторов бустера приведены для энергии выпуска

Количество резонаторов в бустере – 3 шт., в накопителе – 5 шт. Параметры одного резонатора на основной моде приведены в **Таблице 3.3.1.**

Основные части резонатора (обечайка с левой торцевой стенкой, правая торцевая стенка) изготавливаются из бескислородной меди и соединяются между собой с помощью электронно-лучевой сварки и пайки в вакуумной печи, образуя неразборный корпус (**Рисунок 3.3.5.**).

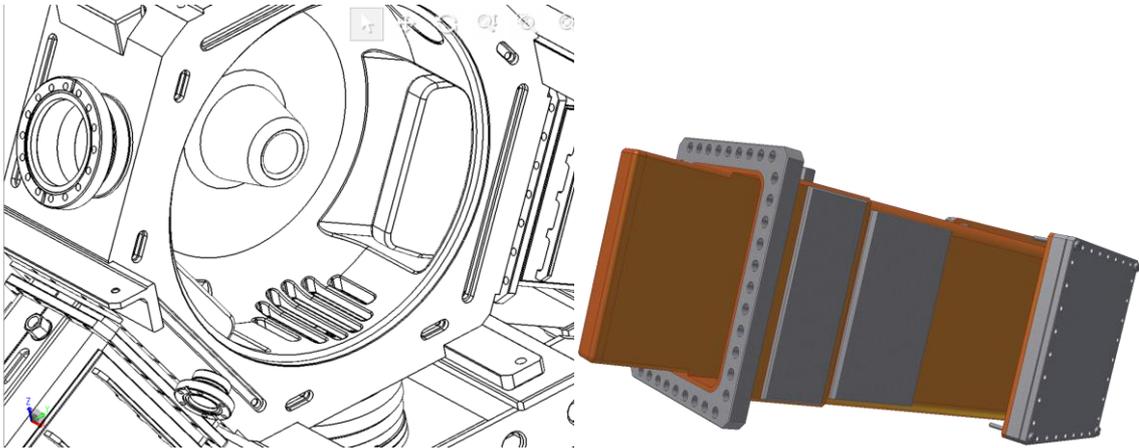
**Рисунок 3.3.5.** Корпус резонатора.

Узлы резонатора (вакуумный насос, датчик вакуума, ввод мощности, датчик напряжения, тюнер основной моды, нагрузки для демпфирования ВМ) присоединяются к портам резонатора (круглым или прямоугольным) с помощью металлических уплотнений типа Conflat и HTMS, что позволяет проводить обезгаживающий прогрев резонатора в сборе. Вакуумный ионно-геттерный насос присоединяется к нижнему порту резонатора; для

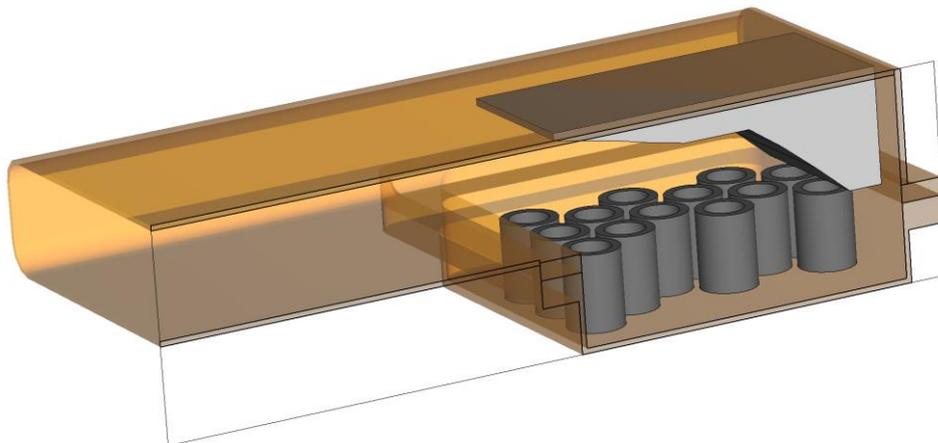
обеспечения откачки в обечайке резонатора выполнены продольные щели, не прерывающие ВЧ-токи основной моды. В стенках резонатора для отвода выделяющегося тепла выполнены каналы водяного охлаждения.

Для демпфирования ВМ к прямоугольным портам 160 x 220 мм в обечайке резонатора присоединяются сдвоенные волноводы (волновод сечением 160 x 220 мм с перегородкой толщиной 36 мм посередине), см. **Рисунок 3.3.6**. Перегородка входит в порт резонатора, являясь элементом связи волноводов с полями ВМ резонатора. Геометрия этого элемента оптимизирована для обеспечения максимальной связи высших мод с СВЧ нагрузкой.

На **Рисунке 3.3.7** показан эскиз собственно нагрузки ВМ с СВЧ поглотителями. В качестве базового варианта для поглотителей выбран материал КТ-30, представляющий собой проводящую керамику. Состав керамики: TiO<sub>2</sub>-30%, А-995-70% (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-99.8%, MgO-0.2%). КТ30 обладает следующими свойствами: диэлектрическая проницаемость ~30, объёмная проводимость ~5 См/м, магнитная проницаемость 1, магнитных потерь нет. Поглощающие элементы выполняются в виде «стаканчиков» (см. **Рисунок 3.3.8**).



**Рисунок 3.3.6.** Присоединение сдвоенного волновода нагрузки ВМ к корпусу резонатора.



**Рисунок 3.3.7.** Эскиз нагрузки ВМ с СВЧ поглотителями.

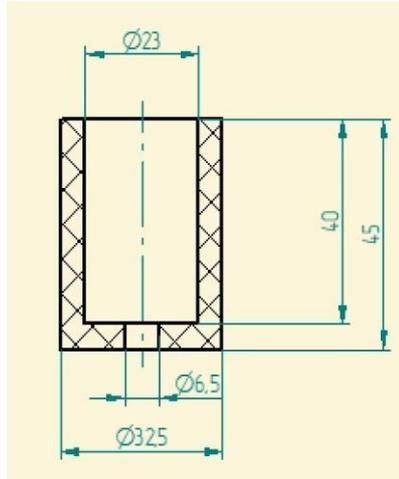


Рисунок 3.3.8. Эскиз СВЧ поглотителя нагрузки ВМ.

Нагрузка оптимизирована по минимуму КСВН в полосе частот в зависимости от количества и расположения поглощающих элементов и формы согласующего выступа на противоположной стенке. Полученная зависимость КСВН о частоты для одной волноводной нагрузки показана на Рисунке 3.3.9.

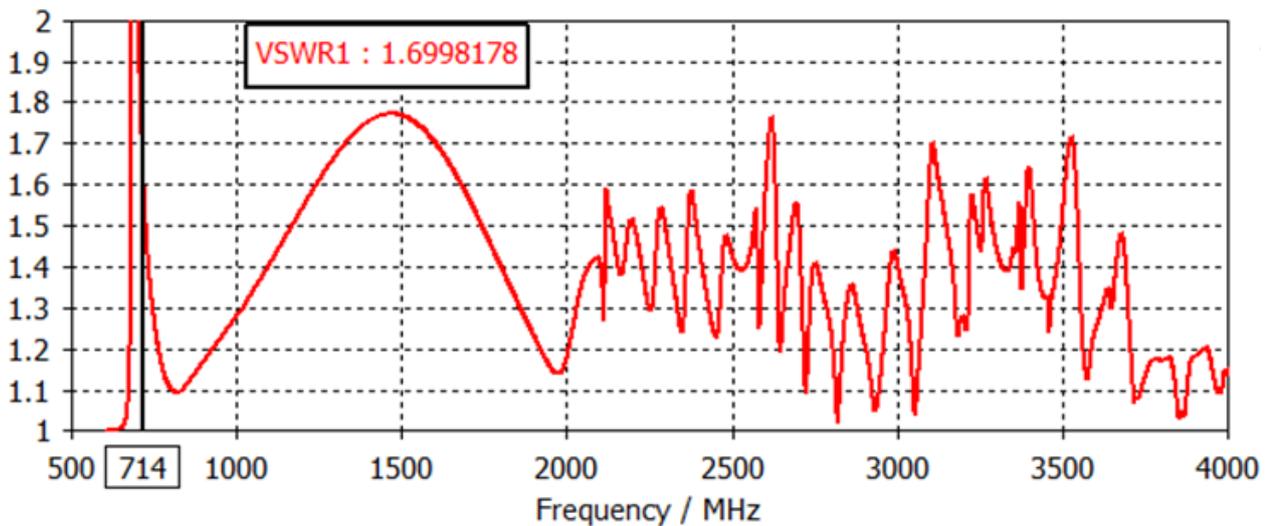


Рисунок 3.3.9. Расчетное значение КСВН волноводной нагрузки ВМ.

Были проведены расчеты предельного тока в накопителе СКИФ по следующей методике. Рассматриваются собственные моды дипольных продольных и поперечных колебаний многосуступчатого пучка при взаимодействии с ускоряющими резонаторами ВЧ системы, а также с импедансом гладкой вакуумной камеры со стенками конечной проводимости. Максимальный по всем модам инкремент колебаний определяет предельный ток, при котором этот максимальный инкремент не превышает декремент радиационного затухания. Кроме того, для тех же импедансов выполнены оценки микроволновой неустойчивости, которая может развиваться при частотах выше частоты среза, при которой длина волны порядка длины сгустка.

**Параметры, при которых выполнены расчеты.**  $E=3\text{GeV}$ ;  $I_0=0.4\text{A}$ ; 0 вигглеров;  $d=27\text{mm}$  - диаметр камеры накопителя;  $\sigma_{Al} = 3.56 \cdot 10^7 \text{ Sm/m}$  - проводимость алюминия;  $f_0=0.629\text{MHz}$  - частота обращения;  $|\eta| = 7.6 \cdot 10^{-5}$  -  $\sigma_{\Delta p/p} = 1.16 \cdot 10^{-3}$  - среднеквадратичный разброс по сгусткам;  $\sigma_z = 5.9 \text{ mm}$  - длина сгустка,  $V_0 = 770 \text{ kV}$  - амплитуда ВЧ напряжения;  $W_{loss} = 535 \text{ keV/turn}$  - радиационные потери на оборот;  $v_s / v_x / v_y = 1.1 \cdot 10^{-3} / 51.445 / 17.597$  - числа продольных и поперечных колебаний на оборот;  $\tau_s / \tau_x / \tau_y = 16 / 19 / 9 \text{ msec}$  - времена радиационного затухания (без вигглеров);  $N_r=5$  - число ускоряющих резонаторов;  $q_{rf} = 567$  - номер гармоники ускоряющего напряжения,  $N_b = 510$  - число сгустков в пучке;  $R = 75.78 \text{ m}$  - радиус накопителя.

**Устойчивость когерентных колебаний.** Максимальный инкремент колебаний несимметричного пучка (число сгустков  $N_b = 510 < N_{b0} = q_{rf} = 567$ ) не превышает максимальный инкремент симметричного пучка (число сгустков  $N_{b0} = q_{rf}$ ) с тем же током одного сгустка  $I_{01} = I_0 / N_b$  (то есть с полным током  $I_{01} N_{b0}$ , на 10% больше, чем  $I_0$ ), для которого инкременты симметричных мод равны

$$\sigma_{sk} = f_0 I_{01} N_{b0} \frac{|\eta|}{2v_s (E/e)} \sum_{p=-p_{\max}}^{p_{\max}} e^{-(pN_{b0}+k)^2 \sigma_s^2 / 2R^2} (pN_{b0} + k) \text{Re}(Z_{\square}((pN_{b0} + k + v_s) f_0)),$$

$$\sigma_{\perp k} = -f_0 I_{01} N_{b0} \frac{R}{2v_{\perp} (E/e)} \sum_{p=-\infty}^{\infty} e^{-(pN_{b0}+k)^2 \sigma_s^2 / 2R^2} \text{Re}(Z_{\perp}(-(pN_{b0} + k - \{v_{\perp}\}) f_0)),$$

$$k = 0, 1, \dots, N_{b0-1}, \quad \perp = x, y, \quad \{\dots\} - \text{дробная часть.}$$

Более точно, для несимметричного пучка решается задача на собственные значения (инкременты и когерентные сдвиги) и собственные вектора комплексных амплитуд колебаний всех сгустков. Расчеты проведены для резонаторов основной гармоники ВЧ системы (ускоряющих), а также для резистивного импеданса стен вакуумной камеры.

**Результаты.** Продольный и поперечный импедансы резонатора рассчитаны программой CST (см. Рисунок ниже). Продольный и поперечный импедансы продольно-однородной вакуумной камеры круглого сечения равны

$$Z_{\square resist}(f_0) = 1.45 \cdot (1-i) \text{ Ohm}; \quad Z_{\square resist}(f) = Z_{\square resist}(f_0) \sqrt{f/f_0};$$

$$Z_{\perp resist}(f_0) = 1.23 \cdot 10^6 \cdot (1-i) \text{ Ohm/m}; \quad Z_{\perp resist}(f) = Z_{\perp resist}(f_0) \sqrt{f_0/f}.$$

Максимальные инкременты колебаний при токе  $I_0 = 0.4\text{A}$  и максимальные токи ( $I_{\max}$ ), при которых максимальный инкремент равен декременту радиационного затухания, рассчитанные по отдельности для взаимодействия с резонаторами ВЧ системы и с вакуумной камерой, приведены в **Таблице 3.3.2**.

**Таблица 3.3.2.** Расчет максимальных инкрементов.

	<b>Прод.</b>	<b>Гориз.</b>	<b>Вертик.</b>
Число колебаний за оборот $\nu_i, i = s, x, y$	0.0011	51.445	17.597
Декремент радиационного затухания $\tau_i^{-1}, c^{-1}$	62	111	53
Макс.инкремент $\sigma_{i\max}$ при токе $I_0 = 0.4A$ (резон.), $c^{-1}$	14.5	9.2	26.8
Макс.ток $I_{\max}$ при $\sigma_{i\max} = \tau_i^{-1}$ (резон.), А	1.7	4.8	0.79
Макс.инкремент $\sigma_{i\max}$ при токе $I_0 = 0.4A$ (вак.кам.), $c^{-1}$	0.002	101.8	349.4
Макс.ток $I_{\max}$ при $\sigma_{i\max} = \tau_i^{-1}$ (вак.кам.), (А)	12400	0.44	0.06

Как видно из таблицы, при рабочем токе 0.4 А ограничений по устойчивости продольных колебаний нет, а для подавления поперечных неустойчивостей нужны обратные связи, особенно для вертикальных колебаний.

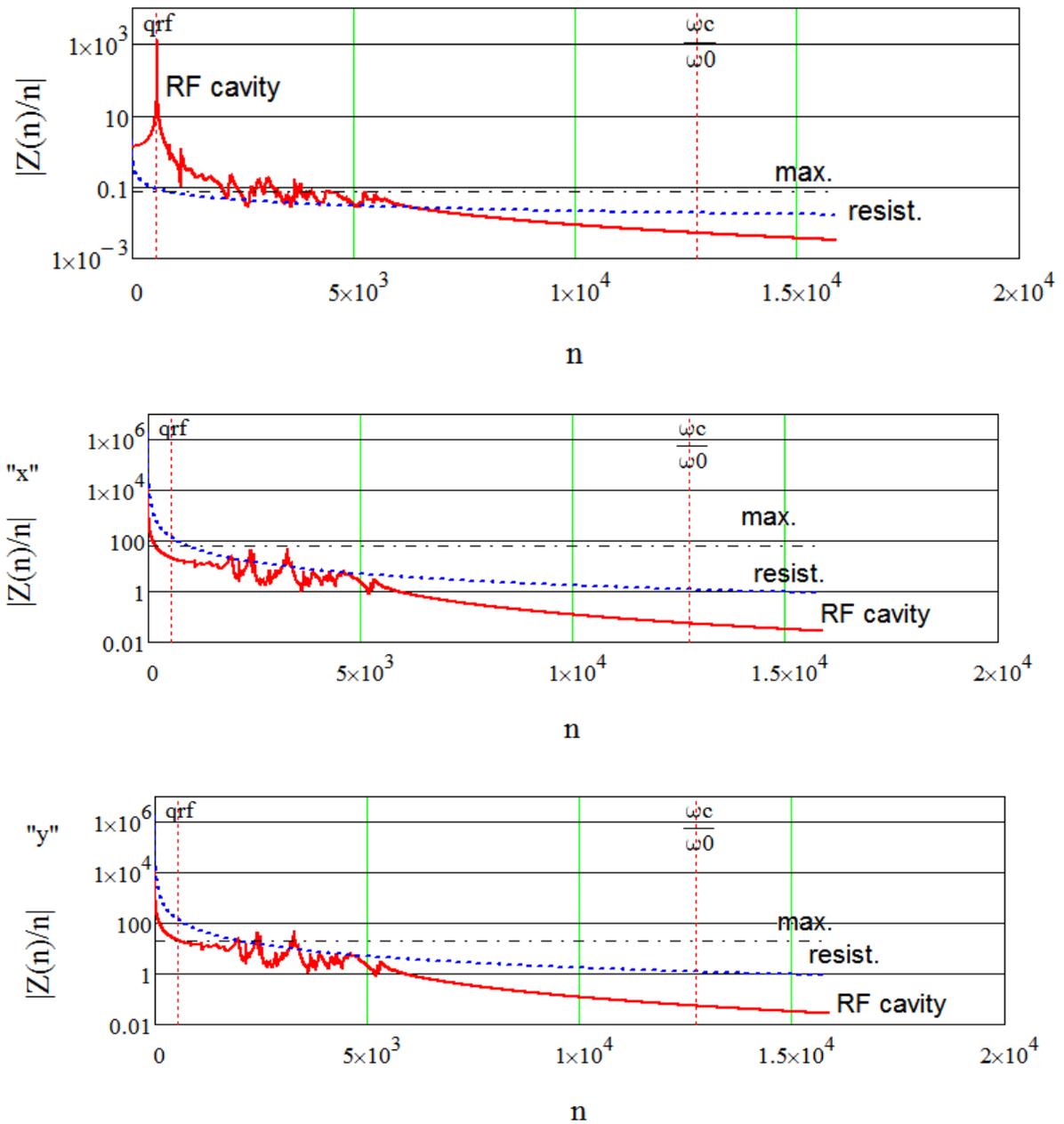
**Микроволновая неустойчивость (МВН).** На частотах выше частоты среза  $f_c = c / 2\pi\sigma_s = 8GHz$ , когда длина волны меньше длины сгустка, возможно развитие микроволновой неустойчивости, если локальный ток пучка или импеданс превышает пороговое значение. Для оценки пороговых по МВН значений импедансов воспользуемся следующими выражениями:

$$\left| \frac{Z_{\parallel}(f)}{f/f_0} \right| \leq \left| \frac{Z_{\parallel}}{n} \right|_{\max} = \frac{2\pi(E/e)|\eta|\sigma_{\Delta p/p}^2}{I_{0loc}} \quad \left| \frac{Z_{\perp}(f)}{f/f_0} \right| \leq \left| \frac{Z_{\perp}}{n} \right|_{\max} = \frac{4\pi(E/e)|\eta|v_{\perp}\sigma_{\Delta p/p}}{I_{0loc}R},$$

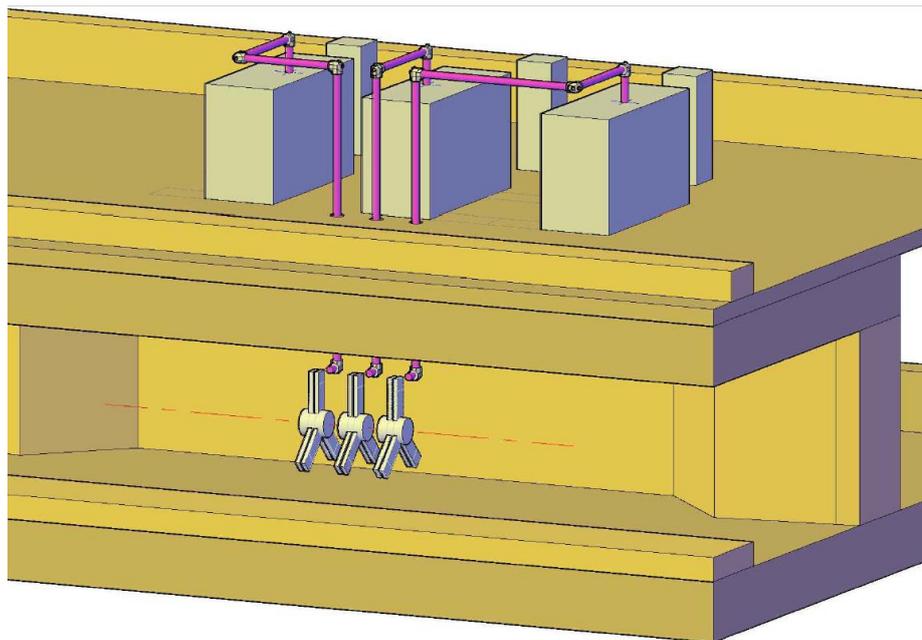
где  $I_{0loc} = I_0 \frac{2\pi R / N_b}{\sqrt{2\pi\sigma_s}} = 25 A$  – максимальный локальный ток пучка.

В **Таблице 3.3.3** приведены пороговые значения нормализованного продольного и поперечного импеданса, импедансы резонаторов и гладкой вакуумной камеры на частоте среза и максимальный ток, при котором не возникает МВН. На **Рисунке 3.3.10** показаны значения нормализованных импедансов.

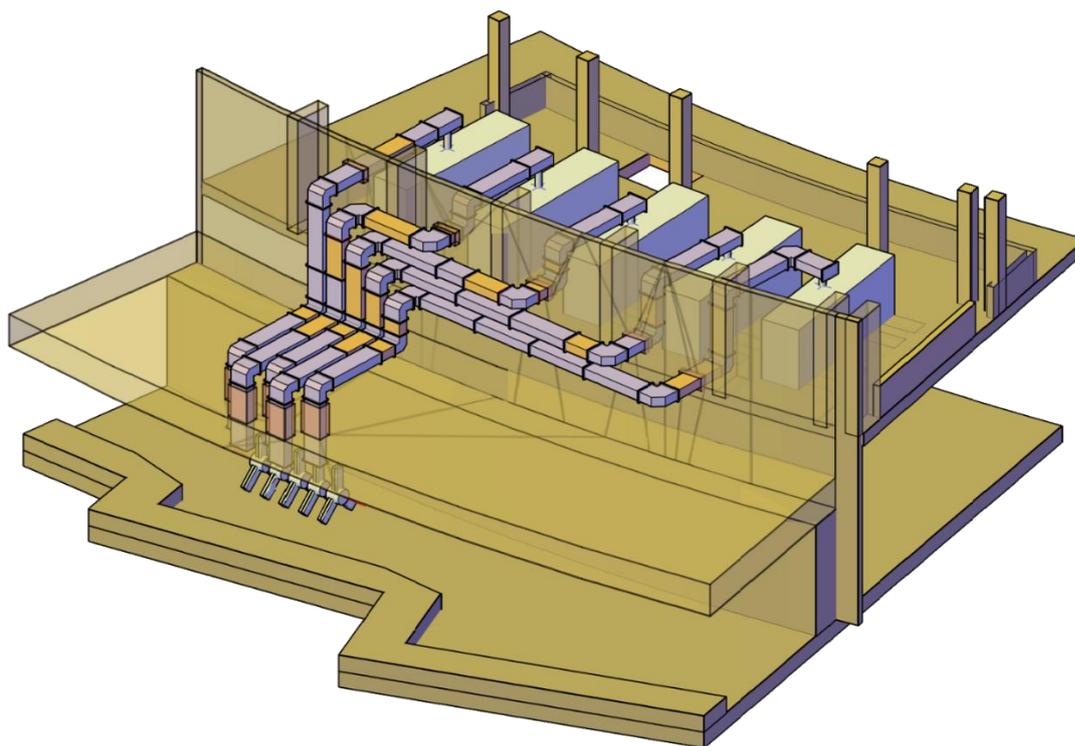
Как видно из таблицы, ограничений по МВН нет.



**Рисунок 3.3.10.** Нормализованный продольный (вверху) и поперечный (x, y) импеданс для пяти ускоряющих ВЧ резонаторов и для резистивного импеданса вакуумной камеры; max - максимальное значение нормализованного импеданса по МВН;  $\omega_c$  – частота среза, выше которой возможно развитие МВН.



**Рисунок 3.3.11.** Схема размещения резонаторов и усилителей мощности бустера: внизу – резонаторы в радиационно-защищенном туннеле,верху – усилители мощности и стойки управления в генераторном зале.



**Рисунок 3.3.12.** Схема размещения резонаторов и усилителей мощности накопителя: внизу – резонаторы в радиационно-защищенном туннеле,верху – усилители мощности и стойки управления в генераторном зале.

**Таблица 3.3.3.** К оценке микроволновой неустойчивости.

	<b>Прод.</b>	<b>Гориз.</b>	<b>Вертик.</b>
Порог. норм. Импеданс $ Z/n _{\max}$ при $I_0 = 0.4A$	0.077 Ом	52 Ом/м	18 Ом/м
$ Z/n _{\max}$ резонаторов при $\omega > \omega_c$	0.005 Ом	0.054 Ом/м	0.053 Ом/м
Максимальный ток $I_{\max}$ (резон.)	6.2 А	385 А	136 А
$ Z/n _{\max}$ стенок вак. камеры при $\omega > \omega_c$	0.018 Ом	1.2 Ом/м	1.2 Ом/м
Максимальный ток $I_{\max}$ (вак.камера)	1.7 А	17.3 А	6 А

Резонаторы в бустере и накопителе размещены в пределах прямолинейных промежутков. ВЧ-мощность передается от усилителей мощности к резонаторам бустера по коаксиальным фидерам, к резонаторам накопителя – по прямоугольным волноводам WR2100. Схемы размещения резонаторов и усилителей показаны на **Рисунке 3.3.11** (бустер) и **Рисунке 3.3.12** (накопитель).

### 3.4 Усилители мощности системы ВЧ питания резонаторов

Для питания резонаторов СКИФ требуются усилители мощности (УМы) на различные частоты, с разным уровнем выходной мощности, работающие в непрерывном или импульсном режимах. Принятые для проектирования усилителей исходные данные приведены в **Таблице 3.4.1**.

В настоящее время усилители с указанными в **Таблице 3.4.1** параметрами технически возможно и целесообразно изготавливать на основе транзисторов, а не электровакуумных приборов (ламп).

**Таблица 3.4.1.** Параметры усилителей мощности.

<b>№ п/п</b>	<b>Подсистема, нагрузка</b>	<b>Рабочая частота, МГц</b>	<b>Макс.вых. мощность, кВт</b>	<b>Режим работы<sup>*)</sup></b>	<b>УМов, шт.</b>
<b>1</b>	<b>Линак</b>				
1.1	Резонатор ВЧ пушки	178	700	Имп (100 мс/1 Гц)	1
1.2	Группирующий резонатор	534	10	Имп (100 мс/1 Гц)	1
<b>2</b>	<b>Бустер</b>				
2.1	Ускоряющий резонатор	357	80	Непр	3
<b>3</b>	<b>Накопитель</b>				
3.1	Ускоряющий резонатор	357	160	Непр	5
3.2	Резонатор 3-й гармоники ВЧ	1 071	12	Непр	3

\*) В столбце «Режим работы» для импульсного режима в скобках указаны длительность импульса и частота повторения.

### 3.4.1 CW усилители мощности на частоту 357 МГц

Усилители используются для ВЧ питания ускоряющих резонаторов бустера и накопительного кольца. Усилитель для резонатора накопителя строится на базе телевизионных передатчиков серии «Полярис», имеющей многолетнюю историю производства и эксплуатации. Усилитель ISM.160K.357 предназначен для линейного усиления моногармонического ВЧ сигнала рабочей частоты в непрерывном режиме (CW). Конструкция является модульной, с параллельным усилением непрерывного сигнала транзисторными усилительными блоками и последующим суммированием мощностей.

Ключевыми особенностями усилителя ISM.160K.357 являются:

- Полностью транзисторное усиление
- Циркулятор на каждый транзистор
- Полностью «врубное» (без фиксации соединений замковыми устройствами) исполнение усилителей
- Полностью жидкостное охлаждение всех элементов
- Полностью припаянные транзисторы
- Отсутствие высоконагруженных элементов
- Возможность свободного размещения усилительных стоек
- Контроль выходной мощности каждой стойки
- Возможность управления напряжением питания оконечных каскадов
- Быстрая защита по отраженной мощности
- Возможность долговременной работы на полностью отражающую нагрузку при любой фазе коэффициента отражения
- Дистанционный контроль и управление (web, SNMP)

В **Таблице 3.4.1.1** приведены основные технические характеристики усилителя. На **Рисунках 3.4.1.1** и **3.4.1.2** приведены эскизы усилителя.

Получая на вход ВЧ сигнал мощностью около 1.5 Вт и команду «Разрешение работы» +12 В, усилитель ISM.160K.357 отдает с выхода номинальную мощность. Входной ВЧ сигнал усиливается до мощности 800-1000 Вт предварительным усилителем и несколько раз делится, распределяясь сначала по 4-м усилительным стойкам, затем по 12-ти усилительным кассетам в каждой стойке, затем по 6-ти усилительным ячейкам в каждой кассете.

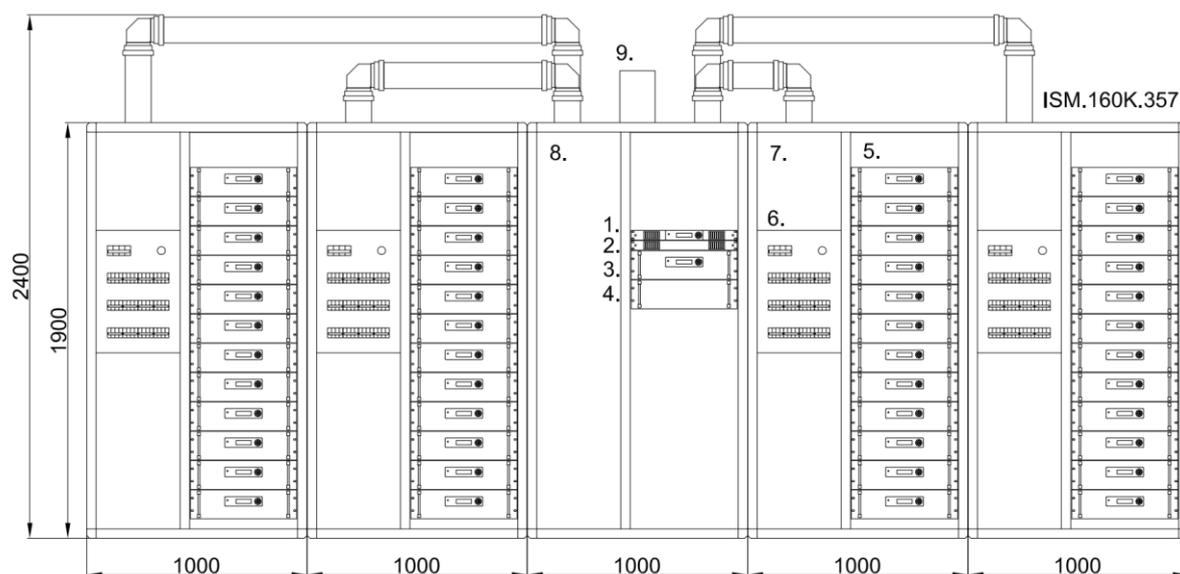
После усиления транзисторными ячейками происходит сложение усиленных сигналов по схеме, аналогичной делению. Прохождение ВЧ сигнала иллюстрируется **Рисунками 3.4.1.3** и **3.4.1.4**:

1. Вход блока управления U104 (**Рисунок 3.4.1.3**): измеряется входной уровень; блокируется ВЧ ключом при внутренних авариях усилителя и при отсутствии команды «Разрешение работы».
2. Вход блока предварительного усилителя U105 (**Рисунок 3.4.1.4**): производится линейное усиление двумя каскадами транзисторных усилителей; далее синфазный пассивный делитель ВЧ сигнала U106 распределяет сигнал между четырьмя выходами. Сигналы на выходах делителя имеют одинаковые уровни и фазы. С выходов делителя сигналы

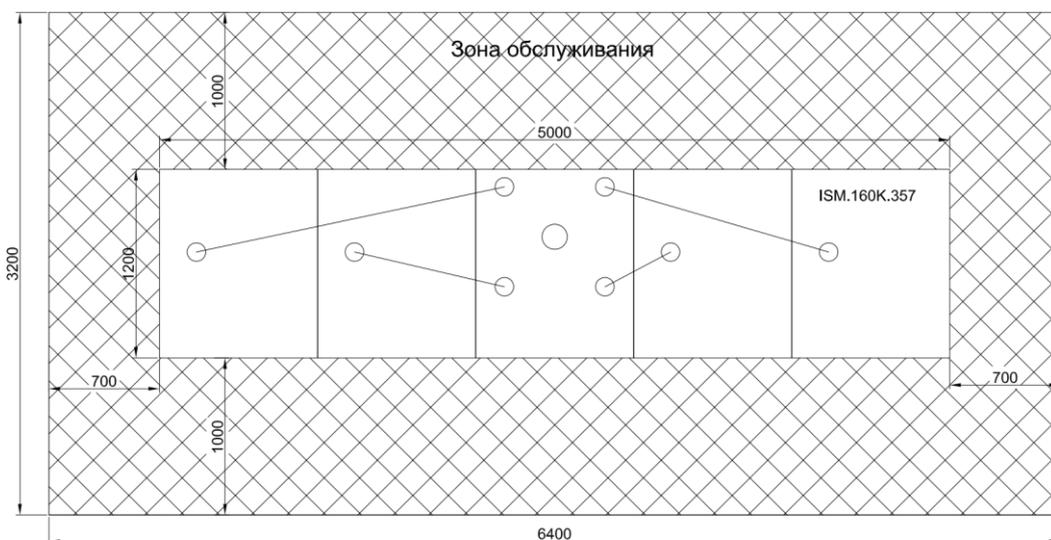
- поступают на четыре однотипных усилительных стойки ST1-ST4. Ниже приводится описание одной стойки.
3. В усилительной стойке ST1 (2, 3 или 4) синфазный пассивный делитель ВЧ сигнала (блок U502, **Рисунок 3.4.1.4**) распределяет сигнал между 12-ю выходами. Сигналы на выходах делителя имеют одинаковые уровни и фазы.
  4. С выхода делителя сигнал поступает в блок усилителя мощности (усилительную кассету) ISM.3600.357 (**Рисунок 3.4.1.4**). В стойке 12 усилительных блоков ISM.3600.357 (всего в усилителе – 48 шт.). В блоке сигнал синфазно делится на 6 и поступает на 6 усилительных ячеек. Каждая усилительная ячейка содержит по одному транзистору BLF978PU и по одному циркулятору. Усиленные сигналы ячеек синфазно складывается в сумматоре 6 в 1, на выходе которого установлен рефлектометр и выходной ВЧ разъем. Усилитель мощности имеет систему защиты, аналогичную системе в предварительном усилителе.
  5. Сумматор 12 в 1 (блок U503, **Рисунок 3.4.1.4**). К сумматору жесткими линиями 1 5/8" подключаются выходы усилителей мощности ISM.3600.357. Сложение мощности происходит синфазно, с трансформацией волнового сопротивления в 50 Ом выходного коаксиального тракта стойки сечением 4 1/2".
  6. Рефлектометр (блок U504, **Рисунок 3.4.1.4**). На выходе сумматора каждой усилительной стойки установлен рефлектометр для контроля уровня мощности. Контрольный сигнал с детектора подается на общий блок управления U104.

**Таблица 3.4.1.1.** Основные технические характеристики усилителя мощности ISM.160K.357 для ВЧ питания ускоряющего резонатора накопительного кольца.

Рабочая частота	355÷359 МГц
Выходная мощность	150 кВт CW
Выходной разъем	EIA 6 1/8", 50 Ом
Входная мощность	1.5 Вт
Входной разъем	SMA, 50 Ом
Усиление	50 дБ
Компрессия усиления	3 дБ при 150 кВт
Электропитание	400 В, 50 Гц, 4 ввода
Потребляемая мощность	267 кВт, 270 кВА
Тепловыделение	107 кВт при КВСН < 1.1 214 кВт при КВСН > 10
Охлаждение	Вода
Расход жидкости	300 л/мин
Перепад давления «Вход-Выход»	до 1.5 бар
Разница температур «Выход-Вход»	6°С при КВСН < 1.1 >12 °С при КВСН > 10
Габариты ГхШхВ	1200х5000х2400 мм
Вес	Около 3000 кг 500 кг/м2
Рабочие температуры окружающей среды	+5÷ +45°С



**Рисунок 3.4.1.1.** Эскиз усилителя мощности ISM.160K.357 для ВЧ питания ускоряющего резонатора накопительного кольца (вид спереди). На рисунке цифрами обозначены: 1 – Блок управления, 2 – Блок дистанционного контроля СДК-5, 3 – Предварительный усилитель 850 Вт, 4 – Делитель на 4, 5 – Усилитель мощности 3.6 кВт, 6 – Распределительный щит, 7 –Стойка с усилителями, 8 – Стойка с выходным сумматором, 9– Рефлектометр.



**Рисунок 3.4.1.2.** Эскиз усилителя мощности ISM.160K.357 для ВЧ питания ускоряющего резонатора накопительного кольца (вид сверху) и требуемая зона обслуживания.

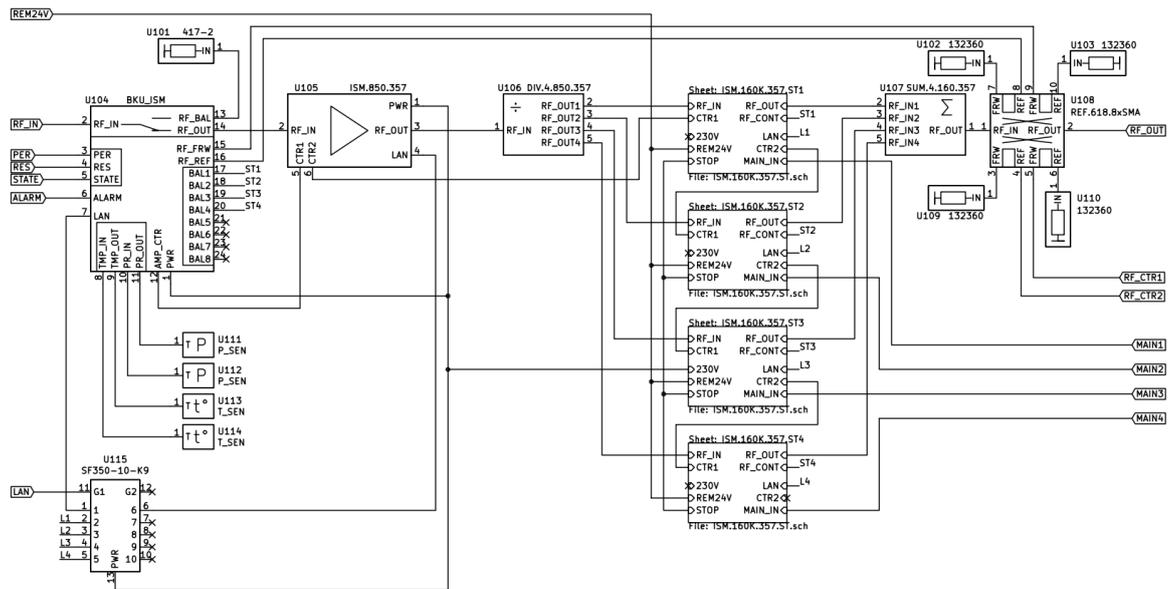


Рисунок 3.4.1.3. Блок схема усилителя мощности ISM.160K.357.

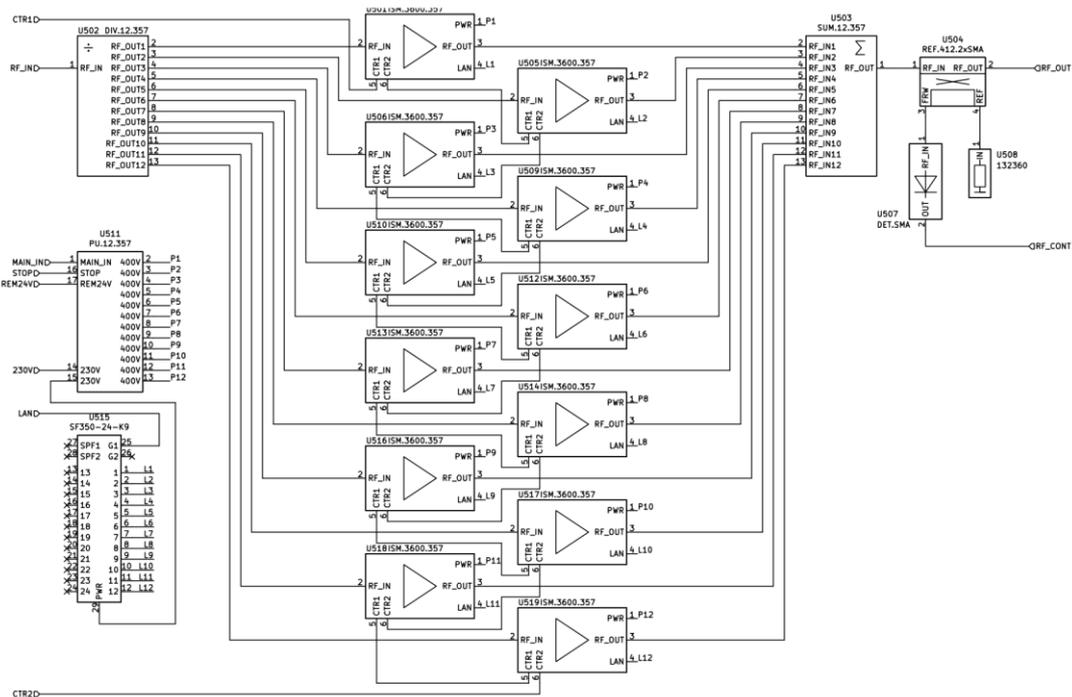


Рисунок 3.4.1.4. Блок схема усилительной стойки усилителя мощности ISM.160K.357.

7. Сумматор 4 в 1 (блок U107 Рисунок 3.4.1.3). Выходы усилительных стоек ST1-ST4 подключены к синфазному сумматору, с трансформацией до 50 Ом выходного коаксиального тракта усилителя сечением 6 1/8".
8. Рефлектометр (блок U108, Рисунок 3.4.1.3). На выходе сумматора усилителя ISM.160K.357 установлен рефлектометр с регулируемой связью и высокой направленностью для контроля уровня мощности. Рефлектометр имеет 4 независимых зонда с линиями связи с разъёмами SMA, с регулируемой связью и высокой

направленностью. Сигналы с двух зондов подаются на блок управления для измерения выходной и отражённой мощностей. Остальные два зонда предназначены для нужд потребителя.

Ниже кратко описываются особенности конструкции усилителя ISM.160K.357.

### **3.4.1.1 Блок предварительного усилителя**

В блоке (поз. 3, **Рисунок 3.4.1.1**) производится линейное усиление двумя каскадами транзисторных усилителей с оконечным каскадом на двух транзисторах BLF184XRG до мощности 800-1000 Вт. Предварительный усилитель имеет систему защиты по перегреву основания ячеек и по токам транзисторов, а также измеряет уровни входной, выходной и отраженной мощностей. Блок имеет связь с блоком системы дистанционного контроля СДК-5 и передает ему все измеренные сигналы и состояние индикации на передней панели.

### **3.4.1.2 Блок усилителя мощности**

Основным усилительным блоком усилителя ISM.160K.357 (поз. 5, **Рисунок 3.4.1.1**) является усилительная кассета ISM.3600.357 с выходной мощностью 3600 Вт. Блок содержит 6 усилительных ячеек с циркуляторами и балластными нагрузками, делитель, сумматор, систему защиты и источник питания. Циркулятор – производства Valvo, Германия. Рассматривается возможность использовать циркуляторы производства А.О. «Феррит-домен» г. Санкт Петербург. Балластная нагрузка циркулятора установлена на жидкостный радиатор и позволяет рассеивать полную мощность ячейки. В ячейке применяется современный вдвоенный транзистор BLF978PU. Транзистор имеет симметричное возбуждение и работает в классе АВ. Напряжение питания транзистора составляет 50 В, которые он получает от встроенного в блок усилителя источника питания. Напряжение питания может регулироваться дистанционно, в пределах от 10 до 50 В. Регулировка напряжения позволяет увеличить КПД при работе усилителя в разных режимах. Блок имеет индикатор и органы управления на передней панели для оперативного контроля состояния.

Блоки усилителей мощности имеют врубное соединение (без фиксации соединений замковыми устройствами) всех интерфейсов – питание 400 В, жидкость, входной сигнал, выходной сигнал, управление, дистанционный контроль, и не требуют доступа с тыльной стороны стойки. Все блоки усилителей взаимозаменяемы и отличаются друг от друга только IP адресом интерфейса системы мониторинга. Усилитель содержит жидкостный радиатор для охлаждения ячеек и источника питания. Для охлаждения применяется деминерализованная вода. Усилитель может работать продолжительное время на номинальной мощности на согласованную и не согласованную нагрузку. Усилители мощности не имеют вентиляторов охлаждения и практически не требуют обслуживания в течение всего срока эксплуатации, кроме поддержания в чистоте передних панелей. На передней панели каждой усилительной кассеты ISM.3600.357 расположены светодиодный и символьный индикаторы, отображающие её текущие состояние.

Усилитель мощности может эксплуатироваться без нескольких усилительных кассет, на их место устанавливаются заглушки разъема управления.

### 3.4.1.3 Блок управления

Основным блоком, через который пользователи взаимодействуют с блоками усилителей мощности (усилительными кассетами), является блок управления (поз. 1, **Рисунок 3.4.1.1**). Он имеет светодиодный индикатор состояния, символьный индикатор и клавиши навигации по меню. На главной странице отображается выходная и отраженная мощности в кВт. Перемещаясь по страницам меню можно считывать основные параметры и изменять режимы работы усилителя.

Блок управления по внешнему сигналу «Разрешение работы», при наличии внутреннего сигнала «Готовность», формирует внутренний сигнал «Разрешение работы» для блоков усилителей мощности, которые, в свою очередь, подают на транзисторы напряжение смещения. При возникновении внутренних аварий блоков усилителей мощности, они снимают напряжение смещения и снимают внутренний сигнал «Готовность» с блока управления. Блок управления меняет статус на «Авария» и снимает внешний сигнал «Готовность». Аварийный модуль фиксирует индикацию аварии. Пользователь, в свою очередь, должен снять внешний сигнал «Разрешение работы» и оценить состояние усилителя. После устранения причины аварии подать кратковременно внешний сигнал «Сброс аварии» и, при необходимости, подать сигнал «Разрешение работы». По внешней команде «Сброс аварии» блок управления меняет статус с «Авария» на «Норма» и приводит индикацию всех блоков в актуальное состояние.

Ниже описан возможный порядок работы с усилителем с точки зрения пользователя.

- Пользователь проверяет наличие внешнего сигнала «Готовность» усилителя мощности.
- При необходимости усиления, подает на усилитель внешний сигнал «Разрешение работы».
- Подает на вход усилителя мощности входной сигнал нужного уровня.
- Оценивает уровень выходной мощности по своим показателям или по системе дистанционного контроля усилителя мощности.
- Продолжает нормальную работу, корректирует уровень напряжения питания и входного сигнала для поддержания требуемых показателей.
- При необходимости закончить усиление снимает входной сигнал и «Разрешение работы» или только «Разрешение работы» или только входной сигнал.
- В случае пропадания сигнала «Готовность» усилителя мощности, нужно оценить состояние по системе дистанционного контроля или непосредственно на усилителе.
- Если причина снятия сигнала «Готовность» понятна и устранена, то нужно подать сигнал «Сброс Аварии» и убедиться в наличии сигнала «Готовность».
- В случае, если уровень мощности не соответствует входному сигналу, а сигнал «Готовность» есть, нужно оценить состояние усилителя по системе дистанционного контроля или непосредственно на усилителе на предмет наличия ошибок, не влияющих на сигнал «Готовность» (например, отказ транзистора).
- Если выходной мощности недостаточно, то сразу принять меры по устранению ошибок, если же мощности достаточно, то сделать это при регламентных работах.

#### **3.4.1.4 Блок дистанционного контроля**

Все блоки усилителей и блок управления подключаются к блоку системы дистанционного контроля (поз. 2, **Рисунок 3.4.1.1**) по локальной сети. На блоке дистанционного контроля работает программное обеспечение, которое опрашивает подключенные блоки, сохраняет в журнал событий все изменения состояний внутренних и внешних сигналов. На встроенном web интерфейсе отображаются все текущие параметры всех блоков. Также можно управлять настройками блока управления. Блок системы мониторинга имеет SNMP агент. Один блок может подключаться сразу к 30-ти усилителям мощности и к нескольким серверам дистанционного контроля. Для формирования графиков параметров и архивного хранения сообщений можно использовать серверное программное обеспечение, например, Zabbix, которое имеет открытый исходный код и распространяется бесплатно. Усилитель имеет шаблон для быстрой настройки мониторинга на Zabbix.

Питание системы осуществляется от трёхфазной сети переменного тока 400 В. Усилитель мощности имеет силовой электрический щит (блок 5, **Рисунок 3.4.1.3**) в каждой усилительной стойке, который осуществляет распределение питающего напряжения 400 В на усилительные блоки. Усилительные блоки содержат источники питания, преобразующие сетевое напряжение в напряжение постоянного тока от 10 В до 50 В. Регулировка выходного напряжения питания осуществляется сигналом с блока управления. Источники питания имеют активные корректоры коэффициента мощности, поэтому коэффициент мощности усилителя близок к единице. Блок управления и предварительный усилитель питаются от однофазной сети переменного тока 230 В и подключаются к электрическим щитам питания. Каждая стойка имеет кнопку аварийного отключения питания, при нажатии которой обесточиваются все усилительные стойки. Один силовой щит имеет реле с обмоткой 24 В для дистанционного управления электропитанием всеми усилительными стойками, а также обход дистанционного управления.

#### **3.4.1.5 Усилители для резонаторов бустера**

Усилители для резонаторов бустера аналогичны усилителям накопителя. В **Таблице 3.4.1.2** приведены основные технические характеристики усилителя.

Усилитель мощности ISM.50K.357 строится на базе ISM.160K.357, описанного выше. Он содержит 2 усилительных стойки вместо четырех и, соответственно, имеет другие делитель и сумматор. Делитель первой ступени имеет 2 выхода. Сумматор последней ступени имеет 2 входа и коаксиальный тракт на выходе 6 1/8".

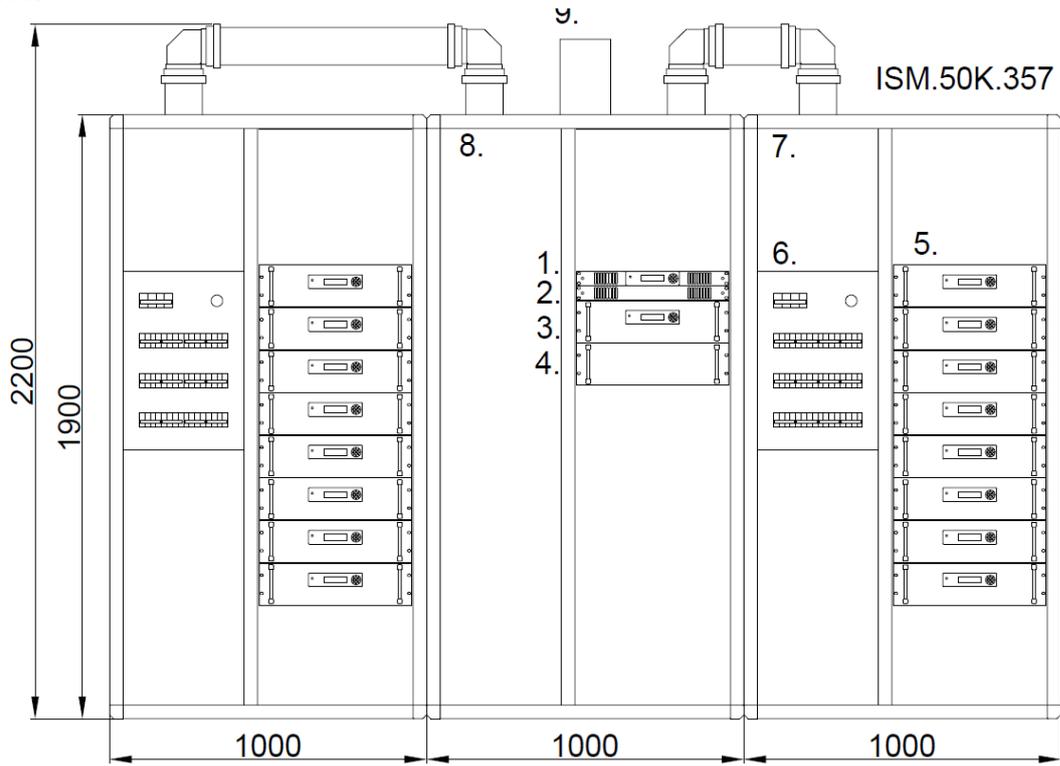
На **Рисунках 3.4.1.5 и 3.4.1.6** приведены эскизы усилителя ISM.50K.357. На **Рисунке 3.4.1.7** приведен вариант размещения ВЧ-усилителей в генераторном зале бустера.

**Таблица 3.4.1.2.** Основные технические характеристики усилителя мощности ISM.50K.357 для ВЧ питания ускоряющего резонатора бустера.

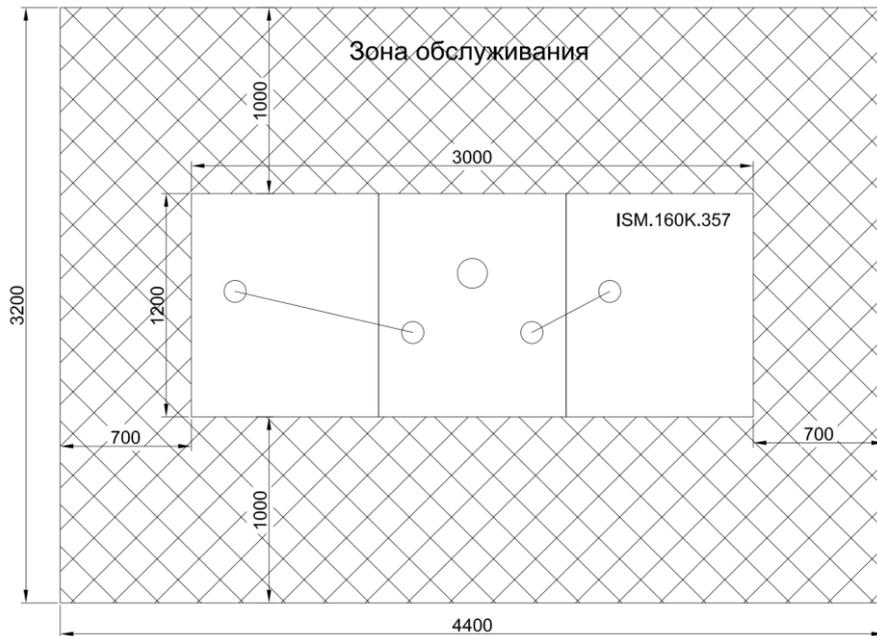
Рабочая частота	355÷359 МГц
Выходная мощность	50 кВт CW
Выходной разъем	EIA 6 1/8", 50 Ом
Входная мощность	≤1 Вт
Входной разъем	SMA, 50 Ом
Усиление	48 дБ
Компрессия усиления	3 дБ при 50 кВт
Электропитание	400 В, 50 Гц, 2 ввода
Потребляемая мощность	135 кВт, 140 кВА
Тепловыделение	60 кВт при КВСН < 1.1 >110 кВт при КВСН > 10
Охлаждение	Жидкостное, водой
Расход жидкости	150 л/мин
Перепад давления «Вход-Выход»	до 1.5 бар
Разница температур «Выход-Вход»	6°C при КВСН < 1.1 >12 °C при КВСН > 10
Габариты ГхШхВ	1200х3000х2200 мм
Вес	Около 1800 кг 500 кг/м <sup>2</sup>
Рабочие температуры окружающей среды	+5÷ +45°C

### 3.4.2CW усилители мощности на частоту 1071 МГц

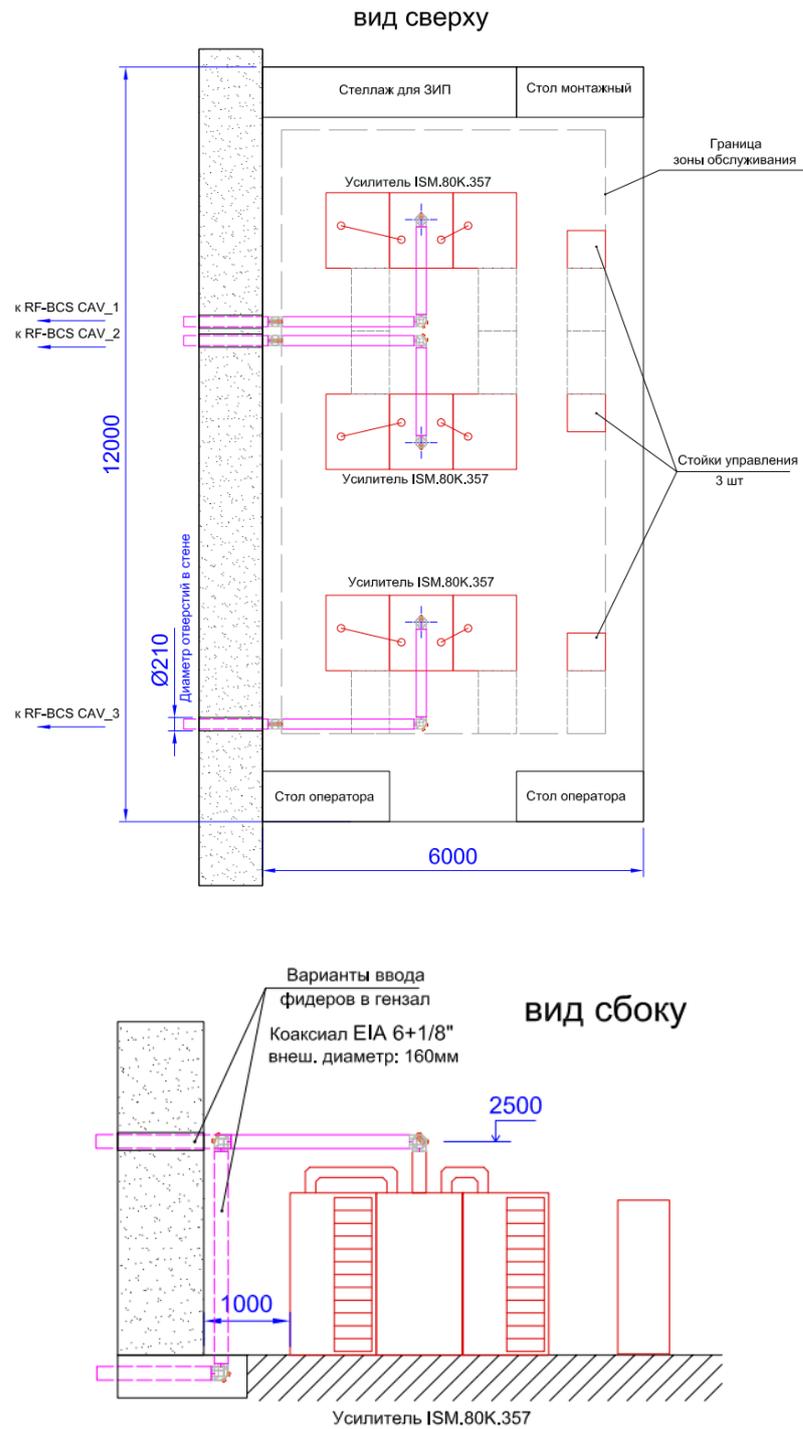
Усилители используются для ВЧ питания резонаторов третьей гармоники накопительного кольца. Усилитель ISM.12K.1071 строится на базе телевизионных передатчиков серии Полярис, имеющей многолетнюю историю производства и эксплуатации. Усилитель предназначен для линейного усиления моногармонического ВЧ сигнала рабочей частоты в непрерывном режиме (CW). Конструкция является модульной, с параллельным усилением непрерывного сигнала транзисторными усилительными блоками и последующим суммированием мощностей.



**Рисунок 3.4.1.5.** Эскиз усилителя мощности ISM.50K.357 для ВЧ питания ускоряющего резонатора бустера (вид спереди). На рисунке цифрами обозначены: 1 – Блок управления, 2 – Блок дистанционного контроля СДК-5, 3 – Предварительный усилитель 850 Вт, 4 – Делитель на 2, 5 – Усилитель мощности 3.6 кВт, 6 – Распределительный щит, 7 –Стойка с усилителями, 8 – Стойка с выходным сумматором, 9 – Рефлектометр 4 зонда.



**Рисунок 3.4.1.6.** Эскиз усилителя мощности ISM.50K.357 для ВЧ питания ускоряющего резонатора бустера (вид сверху) и требуемая зона обслуживания.



**Рисунок 3.4.1.7.** Вариант размещения ВЧ-усилителей в генераторном зале бустера.

Ключевыми особенностями усилителя ISM.80K.357 являются:

- полностью транзисторное усиление,
- циркулятор на каждый транзистор,
- полностью врубное (без фиксации соединений замковыми устройствами) исполнение усилителей,

- полностью жидкостное охлаждение всех элементов,
- полностью припаянные транзисторы,
- отсутствие высоконагруженных элементов,
- возможность свободного размещения усилительных стоек,
- контроль выходной мощности каждой стойки,
- возможность управления напряжением питания оконечных каскадов,
- быстрая защита по отраженной мощности,
- возможность долговременной работы на полностью отражающую нагрузку при любой фазе коэффициента отражения,
- дистанционный контроль и управление (web, SNMP).

В **Таблице 3.4.2.1** приведены основные технические характеристики усилителя.

**Таблица 3.4.2.1.** Основные технические характеристики усилителя мощности ISM.12K.1071 для ВЧ питания резонатора третьей гармоники накопительного кольца.

Рабочая частота	1071±10 МГц
Выходная мощность	12 кВт CW
Выходной разъем	EIA 4 1/2", 50 Ом
Входная мощность	2 Вт
Входной разъем	SMA, 50 Ом
Усиление	38 дБ
Компрессия усиления	3 дБ при 12 кВт
Электропитание	400 В, 50 Гц, 1 ввод
Потребляемая мощность	27.5 кВт, 28 кВА
Тепловыделение	15.5 кВт при КВСН < 1.1 >24 кВт при КВСН > 10
Охлаждение	Жидкостное, водой
Расход жидкости	50 л/мин
Перепад давления «Вход-Выход»	до 1.5 бар
Разница температур «Выход-Вход»	6°C при КВСН < 1.1 >12°C при КВСН > 10
Габариты ГхШхВ	1200x1000x1700 мм
Вес	Около 500 кг 400 кг/м2
Рабочие температуры окружающей среды	+5÷+45°C

На **Рисунках 3.4.2.1 и 3.4.2.2** приведены эскизы усилителя.

Получая на вход ВЧ сигнал мощностью около 2 Вт и команду «Разрешение работы» +12 В, усилитель ISM.12K.1071 отдает с выхода номинальную мощность. Входной ВЧ сигнал усиливается до мощности 500 Вт предварительным усилителем и несколько раз делится, распределяясь сначала по 5-ти усилительным каскадам, затем по 6-ти усилительным ячейкам в каждой каскаде. После усиления транзисторными ячейками происходит сложение усиленных сигналов по аналогичной делению схеме.

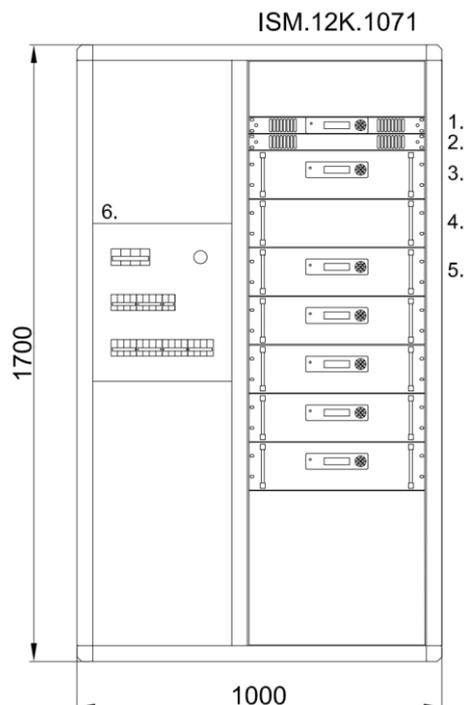
Прохождение ВЧ сигнала (см. **Рисунок 3.4.2.3**).

1. Вход блока управления U2 (**Рисунок 3.4.2.3**). Измеряется входной уровень. Блокируется ВЧ ключом при внутренних авариях усилителя и при отсутствии команды «Разрешение работы».
2. Вход блока предварительного усилителя U8 (**Рисунок 3.4.2.3**). Производится линейное усиление двумя каскадами транзисторных усилителей.
3. Синфазный пассивный делитель ВЧ сигнала U9 (**Рисунок 3.4.2.3**) распределяет сигнал между пятью выходами. Сигналы на выходах делителя имеют одинаковые уровни и фазы.
4. С выхода делителя сигнал поступает в блок усилителя мощности (усилительную кассету) ISM.2600.1071 (U10-14, **Рисунок 3.4.2.3**). В стойке 5 усилительных блоков ISM.2600.1071. В блоке сигнал синфазно делится на 6 и поступает на 6 усилительных ячеек. Каждая усилительная ячейка содержит по одному транзистору BLF13H9LS750P и по одному циркулятору. Усиленные сигналы ячеек синфазно складывается в сумматоре 6 в 1, на выходе которого установлен рефлектометр и выходной ВЧ разъем. Усилитель мощности имеет систему защиты, аналогичную системе в предварительном усилителе.
5. Сумматор 5 в 1 (блок U15, **Рисунок 3.4.2.3**). К сумматору жесткими линиями 1 5/8" подключаются выходы усилителей мощности ISM.2600.1071. Сложение мощности происходит синфазно, с трансформацией волнового сопротивления в 50 Ом выходного коаксиального тракта стойки сечением 4 1/2".
6. Рефлектометр (блок U19, **Рисунок 3.4.2.3**). На выходе сумматора установлен рефлектометр с регулируемой связью и высокой направленностью для контроля уровня мощности. Рефлектометр имеет 4 независимых зонда с разъёмами SMA. Сигналы с двух зондов подаются на блок управления для измерения выходной и отражённой мощности. Остальные два зонда предназначены для нужд потребителя.

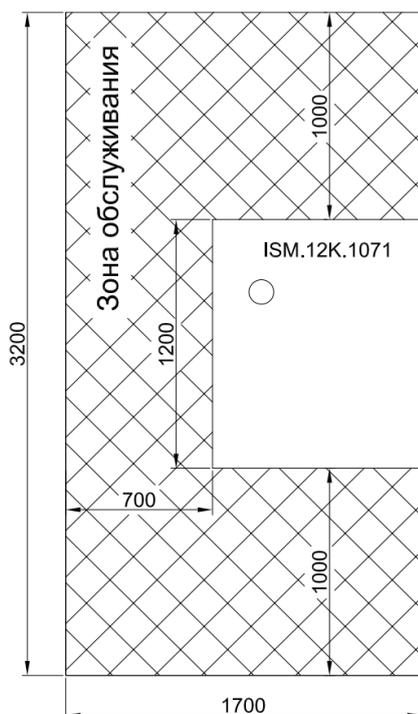
Особенности конструкция усилителя ISM.12K.1071:

### **3.4.2.1 Блок предварительного усилителя**

- В блоке (поз. 3, **Рисунок 3.4.2.1**) производится линейное усиление двумя каскадами транзисторных усилителей на транзисторах BLF881 и BLF13H9LS750P до мощности 500 Вт. Предварительный усилитель имеет систему защит по перегреву основания ячеек и по токам транзисторов, а также измеряет уровни входной, выходной и отраженной мощностей. Блок имеет связь с блоком системы дистанционного контроля СДК-5 и передает ему все измеренные сигналы и состояние индикации на передней панели.



**Рисунок 3.4.2.1.** Эскиз усилителя мощности ISM.12K.1071 для ВЧ питания резонатора третьей гармоники накопительного кольца (вид спереди). На рисунке цифрами обозначены: 1 – Блок управления, 2 – Блок дистанционного контроля СДК-5, 3 – Предварительный усилитель 500 Вт, 4 – Делитель на 4, 5 – Усилитель мощности 3.6 кВт, 6 – Распределительный щит.



**Рисунок 3.4.2.2.** Эскиз усилителя мощности ISM.12K.1071 для ВЧ питания резонатора третьей гармоники накопительного кольца (вид сверху) и требуемая зона обслуживания.

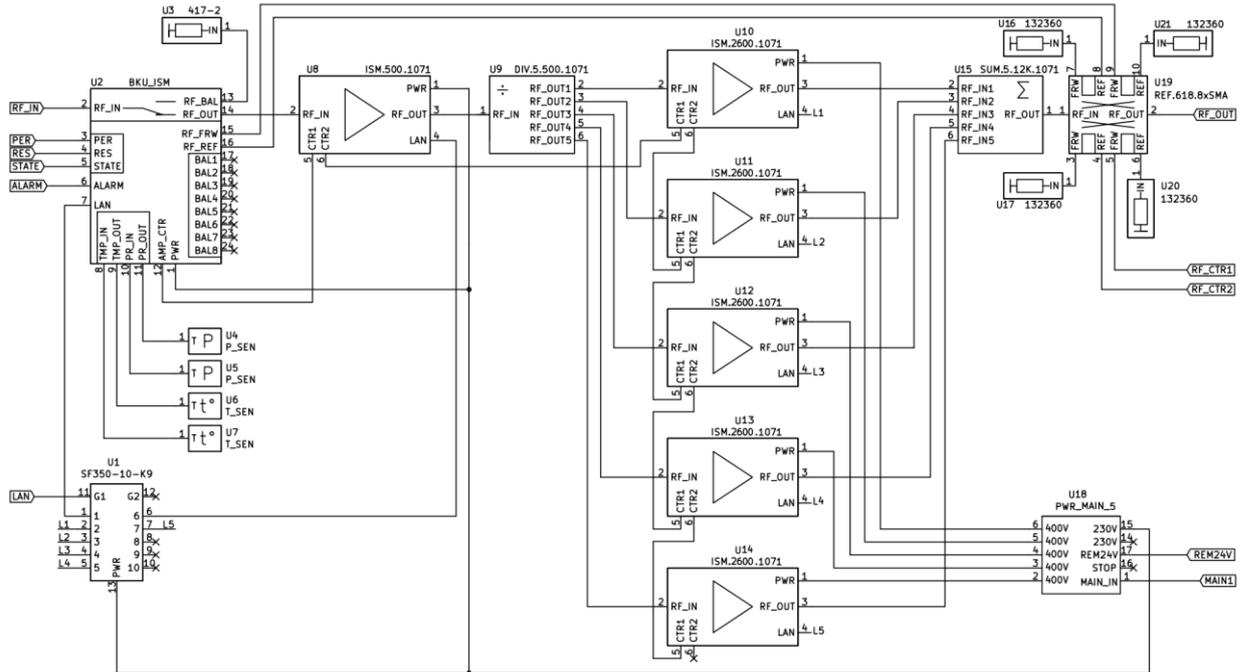


Рисунок 3.4.2.3. Блок схема усилителя мощности ISM.12K.1071.

### 3.4.2.2 Блок усилителя мощности

Основным усилительным блоком усилителя ISM.12K.1071 является усилительная кассета ISM.2600.1071 с выходной мощностью 2600 Вт (поз. 5, Рисунок 3.4.2.1). Блок содержит 6 усилительных ячеек с циркуляторами и балластными нагрузками, делитель, сумматор, систему защиты и источник питания. В ячейке применяется современный транзистор BLF13H9LS750P. Циркулятор – производства Valvo, Германия. В линейке циркуляторов Valvo нет модели на нужную частоту, но есть очень близкая по частоте модель VBK1360A, на базе которой производитель готов разработать нужное устройство. Балластная нагрузка циркулятора установлена на жидкостный радиатор, и позволяет рассеивать полную мощность ячейки. Сдвоенный транзистор имеет симметричное возбуждение. Транзистор работает в классе АВ. Напряжение питания транзистора составляет 50 В, которые он получает от встроенного в блок усилителя источника питания. Напряжение питания может регулироваться дистанционно, в пределах от 10 до 50 В.

Блоки усилителей мощности имеют врубное соединение (без фиксации соединений замковыми устройствами) всех интерфейсов - питание 400 В, жидкость, входной сигнал, выходной сигнал, управление, дистанционный контроль. Все кассеты взаимозаменяемы и отличаются друг от друга только IP адресом интерфейса системы мониторинга. Усилитель содержит жидкостный радиатор для охлаждения ячеек и источника питания. Для охлаждения применяется деминерализованная вода или смесь воды и этиленгликоля (не более 50%). Усилитель может работать продолжительное время на номинальной мощности на согласованную и не согласованную нагрузки. Усилители мощности не имеют вентиляторов охлаждения и практически не требуют обслуживания в течение всего срока эксплуатации, кроме поддержания в чистоте передних панелей.

Усилитель мощности может эксплуатироваться без нескольких усилительных кассет, на их место устанавливаются заглушки разъема управления.

### 3.4.2.3 Блок управления

Основным блоком, через который пользователи взаимодействуют с блоками усилителей мощности (усилительными кассетами), является блок управления (поз. 1, **Рисунок 3.4.2.1**). Он имеет светодиодный индикатор состояния, символьный индикатор и клавиши навигации по меню. На главной странице отображается выходная и отраженная мощности в кВт. Перемещаясь по страницам меню можно считывать основные параметры и изменять режимы работы усилителя.

Блок управления по внешнему сигналу «Разрешение работы», при наличии внутреннего сигнала «Готовность», формирует внутренний сигнал «Разрешение работы» для блоков усилителей мощности, которые, в свою очередь, подают на транзисторы напряжение смещения. При возникновении внутренних аварий блоков усилителей мощности, они снимают напряжение смещения и снимают внутренний сигнал «Готовность» с блока управления. Блок управления меняет статус на «Авария» и снимает внешний сигнал «Готовность». Аварийный модуль фиксирует индикацию аварии. Пользователь, в свою очередь, должен снять внешний сигнал «Разрешение работы» и оценить состояние усилителя. После устранения причины аварии подать кратковременно внешний сигнал «Сброс аварии» и, при необходимости, подать сигнал «Разрешение работы». По внешней команде «Сброс аварии» блок управления меняет статус с «Авария» на «Норма» и приводит индикацию всех блоков в актуальное состояние.

Порядок работы с усилителем с точки зрения пользователя аналогичен описанному выше порядку работы с усилителем ISM.160K.357.

### 3.4.2.4 Блок дистанционного контроля

Все блоки усилителей и блок управления подключаются к блоку системы дистанционного контроля (поз. 2, **Рисунок 3.4.2.1**) по локальной сети. На блоке дистанционного контроля работает программное обеспечение, которое опрашивает подключенные блоки, сохраняет в журнал событий все изменения состояний внутренних и внешних сигналов. На встроенном web интерфейсе отображаются все текущие параметры всех блоков. Также можно управлять настройками блока управления. Блок системы мониторинга имеет SNMP агент. Один блок может подключаться сразу к 30-ти усилителям мощности и к нескольким серверам дистанционного контроля. Для формирования графиков параметров и архивного хранения сообщений можно использовать серверное программное обеспечение, например, Zabbix, которое имеет открытый исходный код и распространяется бесплатно. Усилитель имеет шаблон для быстрой настройки мониторинга на Zabbix.

Электропитание осуществляется от трёхфазной сети переменного тока 400 В. Усилитель мощности имеет силовой электрический щит (поз. 6, **Рисунок 3.4.2.1**) который осуществляет распределение питающего напряжения 400 В на усилительные блоки. Усилительные блоки содержат источники питания, преобразующие сетевое напряжение в напряжение постоянного тока от 10 до 50 В. Регулировка выходного напряжения питания осуществляется сигналом с блока управления. Источники питания имеют активные корректоры коэффициента мощности, поэтому коэффициент мощности усилителя близок к единице. Блок

управления и предварительный усилитель питаются от однофазной сети переменного тока 230 В и подключаются к электрическому щиту. Стойка имеет кнопку аварийного отключения питания, при нажатии которой обесточивается все цепи питания. Силовой щит имеет реле с обмоткой 24 В для дистанционного управления электропитанием усилительной стойкой, а также обход дистанционного управления.

На **Рисунках 3.4.2.4 и 3.4.2.5** изображены варианты размещения ВЧ усилителей 357 и 1071 МГц в генераторных залах накопительного кольца.

### **3.4.3 Импульсный усилитель мощности на частоту 178 МГц**

Усилитель используется для ВЧ питания резонатора источника электронных сгустков (ВЧ пушки), входящего в состав линейного ускорителя – инжектора электронов в бустер. Импульсный усилитель ISM.700KP.178.100 (**Рисунок 3.4.3.1**) мощностью 700 кВт при длительности 100 мкс строится на базе уже реализованного импульсного усилителя ISM.600KP.162 на 162.5 МГц мощностью 600 кВт при длительности 300 мс, который был разработан и изготовлен для линейного ускорителя по заказу ОИЯИ, г. Дубна. Усилитель предназначен для линейного усиления моногармонического ВЧ сигнала рабочей частоты в импульсном режиме. Конструкция является модульной, с параллельным усилением импульсного сигнала транзисторными усилительными блоками, с последующим суммированием мощностей.

Ключевыми особенностями усилителя ISM.700KP.178.100 являются:

- Полностью транзисторное усиление
- Циркулятор на каждые 2 транзистора
- Полностью врубное (без фиксации соединений замковыми устройствами) исполнение усилителей
- Естественное воздушное охлаждение всех элементов
- Возможность свободного размещения усилительных стоек
- Защита от превышения длительности импульса
- Быстрая защита по отраженной мощности
- Возможность долговременной работы на полностью отражающую нагрузку при любой фазе коэффициента отражения
- Дистанционный контроль и управление (web, SNMP)

В **Таблице 3.4.3.1** приведены основные технические характеристики усилителя.

На **Рисунках 3.4.3.1 и 3.4.3.2** приведены эскизы усилителя.

На **Рисунках 3.4.3.3 и 3.4.3.4** приведены блок схемы усилителя мощности.

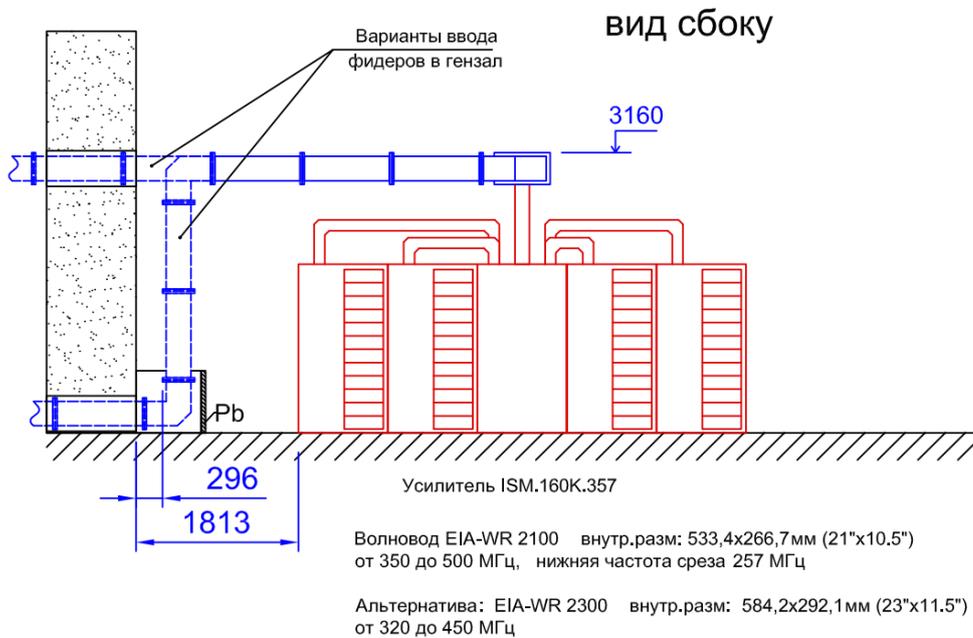
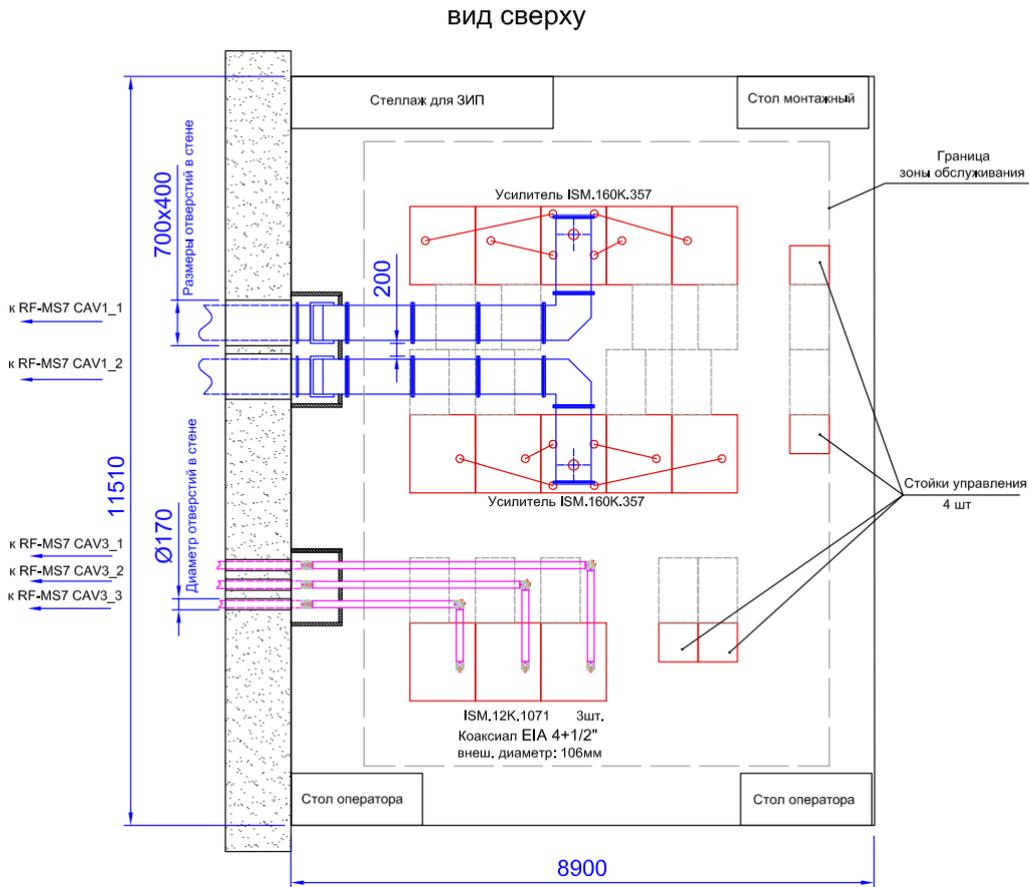


Рисунок 3.4.2.4. Вариант размещения ВЧ усилителей в генераторном зале 1 основного кольца.

## вид сверху

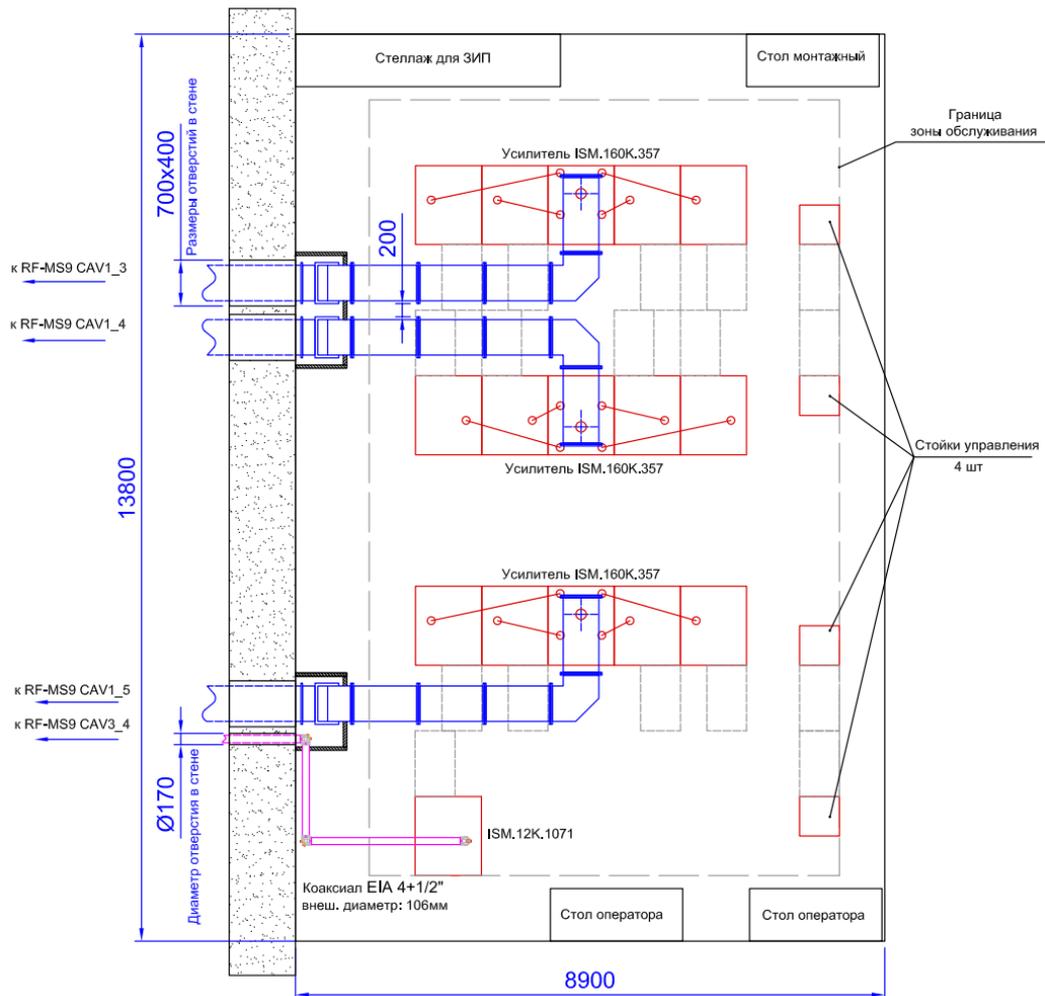
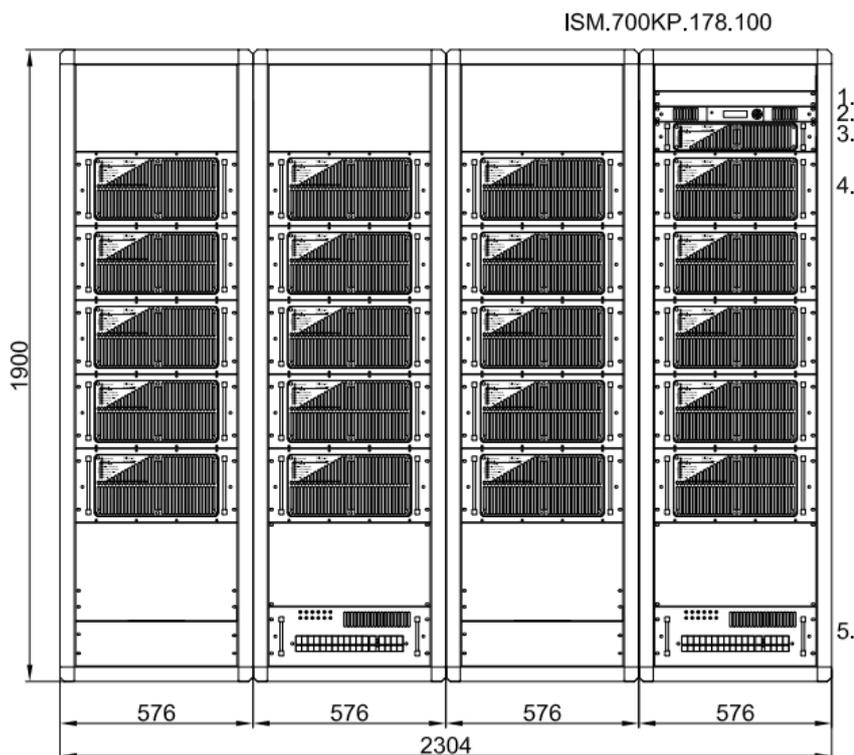


Рисунок 3.4.2.5. Вариант размещения ВЧ усилителей в генераторном зале 2 основного кольца.

Таблица 3.4.3.1. Основные характеристики усилителя мощности ISM.700KP.178.100 для питания резонатора ВЧ пушки.

Рабочая частота	176÷180 МГц
Выходная мощность	700 кВт не более 100 мкс
Выходной разъем	EIA 6 1/8", 50 Ом
Входная мощность	100 мВт
Входной разъем	SMA, 50 Ом
Усиление	68.4 дБ
Компрессия усиления	3 дБ при 700 кВт
Электропитание	230/400 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	не более 300 Вт при частоте имп. менее 1 Гц
Охлаждение	Воздушное
Габариты ГхШхВ	1200х2304х1900 мм
Вес	Около 1400 кг 520 кг/м <sup>2</sup>
Рабочие температуры окружающей среды	+5÷+45°C



**Рисунок 3.4.3.1.** Эскиз усилителя мощности ISM.700KP.178.100 для питания резонатора ВЧ пушки (вид спереди). На рисунке цифрами обозначены: 1 – Блок управления, 2 – Блок дистанционного контроля СДК-5, 3 – Предварительный усилитель 400 Вт, 4 – Усилитель мощности 40 кВт, 5 – Блок питания.



**Рисунок 3.4.3.2.** Эскиз усилителя мощности ISM.700KP.178.100 для питания резонатора ВЧ пушки (вид сверху) и требуемая зона обслуживания.



усилительным ячейкам в каждой кассете. После усиления транзисторными ячейками происходит сложение усиленных сигналов по аналогичной делению схеме.

Прохождение ВЧ сигнала (см. **Рисунки 3.4.3.3, 3.4.3.4**).

1. Вход блока управления U104 (**Рисунок 3.4.3.3**). Измеряется входной уровень мощности. Блокируется ВЧ ключом при внутренних авариях усилителя и при отсутствии команды «Разрешение работы».
2. В качестве блока предварительного усилителя U105 (**Рисунок 3.4.3.3**) используется блок усилителя мощности ISM.40KP.178.
3. Синфазный пассивный делитель ВЧ сигнала U106 (**Рисунок 3.4.3.3**) Делит сигнал на два сигнала с одинаковыми уровнями и фазами. С выходов делителя сигналы поступают на две однотипных группы усилителей, размещённые в двух стойках каждая. Ниже приводится описание одной группы.
4. Синфазный пассивный делитель ВЧ сигнала U202 (**Рисунок 3.4.3.4**), делит сигнал на 10 сигналов с одинаковыми уровнями и фазами.
5. Блок усилителя мощности ISM.40KP.178 (блоки U201, U204-U207, U209-U211, U213, U214 на **Рисунке 3.4.3.4**). Входной сигнал синфазно делится на 8 и поступает на 8 усилительных ячеек. Каждая усилительная ячейка содержит по 4 транзистора. На входе ячейки имеется синфазный делитель на 2. Далее – квадратурные направленные осветители 3 дБ. Усиленный сигнал с транзистора складывается на квадратурном сумматоре 2 в 1. После этого сигнал поступает на ВЧ изолятор с балластной нагрузкой, которая принимает на себя всю мощность рассогласования и отражения. Сигналы с двух изоляторов суммируются синфазно и поступают на выходной разъем усилительной ячейки. Все ячейки подключаются к синфазному сумматору 8 в 1, на выходе которого установлены рефлектометр и выходной ВЧ разъем.
6. Сумматор 10 в 1 (блок U203, **Рисунок 3.4.3.4**), 2шт. К сумматорам, кабельными переключками подключаются по 10 усилителей мощности. Сложение мощности происходит синфазно с последующей трансформацией волнового сопротивления в 50 Ом коаксиального тракта сечением 6-1/2".
7. Сумматор 2 в 1 (U107, **Рисунок 3.4.3.3**). Выходы сумматоров 10 в 1 подключены к синфазному сумматору, с последующей трансформацией до 50 Ом коаксиального тракта сечением 6-1/8".
8. Рефлектометр с регулируемой связью и высокой направленностью. (U108, **Рисунок 3.4.3.3**). Рефлектометр имеет 4 независимых зонда с разъёмами SMA. Сигналы с двух зондов подаются на блок управления для измерения выходной и отражённой мощностей. Остальные два зонда предназначены для нужд потребителя.

Особенности конструкции усилителя ISM.700KP.178.100:

### **3.4.3.1 Блок предварительного усилителя**

В качестве блока предварительного усилителя U105 (поз. 3, **Рисунок 3.4.3.1, Рисунок 3.4.3.3**) используется блок усилителя мощности ISM.40KP.178. Блок имеет связь с блоком системы дистанционного контроля СДК-5 и передает ему все измеренные сигналы и состояние индикации на передней панели. На передней панели расположен светодиодный индикатор, отображающий текущие состояние блока усилителя мощности.

### 3.4.3.2 Блок усилителя мощности

Блок (усилительная кассета) ISM.40KP.178. является основным усилительным элементом (поз. 4, **Рисунок 3.4.3.1**). На входе сигнал делится синфазно на 8 и поступает на 8 усилительных ячеек (**Рисунок 3.4.3.5**). Каждая усилительная ячейка содержит по 4 транзистора ART2KOPEG. На входе ячейки есть синфазный делитель на 2. Далее – квадратурные направленные ответвители 3 дБ. Сдвоенный транзистор имеет симметричное возбуждение. Транзистор работает в классе АВ во время прохождения импульса и переключается в класс С после окончания импульса. Управление напряжением смещения происходит стробирующим сигналом, выделенным из входного сигнала системой защиты. Напряжение питания транзистора составляет 50 В, которые он получает от батареи конденсаторов. Подпитка батареи между импульсами происходит от внешнего источника питания 50 В, расположенного в стойке. Усиленный сигнал с транзистора складывается на квадратурном сумматоре 2 в 1. После этого сигнал поступает на ВЧ изолятор с балластной нагрузкой, которая принимает на себя всю мощность рассогласования и отражения. Циркулятор – производства Admotech, Ю.Корея. Сигналы с двух изоляторов суммируются синфазно и поступают на выходной разъем усилительной ячейки. Все ячейки подключаются к синфазному сумматору 8 в 1, на выходе которого установлен рефлектометр и выходной ВЧ разъем. Усилитель мощности имеет систему защиты, аналогичную системе в предварительном усилителе, и схему заряда-разряда конденсаторных батарей.

### 3.4.3.3. Блок управления

Основным блоком, через который пользователи взаимодействуют с усилительными кассетами, является блок управления (поз. 1, **Рисунок 3.4.3.1**). Он имеет светодиодный индикатор состояния, символьный индикатор и клавиши навигации по меню. Светодиодный индикатор состояния мигает при поступлении ВЧ импульса. На главной странице символьного индикатора отображается выходная и отраженная мощности в кВт. Перемещаясь по страницам меню, можно считывать основные параметры и изменять режимы работы усилителя.

Блок управления по внешнему сигналу «Разрешение работы» при наличии внутреннего сигнала «Готовность» формирует внутренней сигнал «Разрешение работы» для блоков усилителей мощности, которые, в свою очередь, подают на транзисторы напряжение смещения. При возникновении внутренних аварий блоков усилителей мощности, они снимают напряжение смещения и снимают внутренний сигнал «Готовность» с блока управления. Блок управления меняет статус на «Авария» и снимает внешний сигнал «Готовность». Аварийный модуль фиксирует индикацию аварии. Потребитель, в свою очередь, должен снять внешний сигнал «Разрешение работы» и оценить состояние усилителя. После устранения причины аварии подать кратковременно внешний сигнал «Сброс аварии» и, при необходимости, подать сигнал «Разрешение работы». По внешней команде «Сброс аварии» блок управления меняет статус с «Авария» на «Норма» и приводит индикацию всех блоков в актуальное состояние.



Рисунок 3.4.3.5. Печатная плата усилительной ячейки усилителя ISM.700KP.178.100.

Порядок работы с усилителем с точки зрения пользователя аналогичен описанному выше порядку работы с усилителем ISM.160K.357.

### 3.4.3.4 Блок дистанционного контроля

Все блоки усилителей и блок управления подключаются к блоку системы дистанционного контроля (поз. 2, Рисунок 3.4.3.1) по локальной сети. На блоке дистанционного контроля работает программное обеспечение, которое опрашивает подключенные блоки, сохраняет в журнал событий все изменения состояний внутренних и внешних сигналов. На встроенном web интерфейсе отображаются все текущие параметры всех блоков. Также можно управлять настройками блока управления. Блок системы мониторинга имеет SNMP агент. Один блок может подключаться сразу к 30 усилителям мощности и к нескольким серверам дистанционного контроля. Для формирования графиков параметров и архивного хранения сообщений можно использовать серверное программное обеспечение, например, Zabbix, которое имеет открытый исходный код и распространяется бесплатно. Усилитель имеет шаблон для быстрой настройки мониторинга на Zabbix.

Усилитель мощности имеет два блока питания, которые содержат в себе по 6 модульных источников питания, включенных параллельно и обеспечивающих резервирование при выходе из строя одного источника питания. Состояние модулей отражается на светодиодных индикаторах на передней панели. Питание осуществляется от трехфазной сети переменного тока 400 В. Встроенные модули имеют активные корректоры коэффициента мощности, поэтому коэффициент мощности усилителя близок к единице. Блок управления и предварительный усилитель питаются от однофазной сети переменного тока 230 В и подключаются к блокам питания.

### 3.4.4 Импульсный усилитель мощности на частоту 534 МГц

Усилитель используется для ВЧ питания группирующего резонатора линейного ускорителя – инжектора электронов в бустер. Импульсный усилитель ISM.10KP.535.100, мощностью 10 кВт при длительности 100 мс, строится на базе уже реализованного импульсного усилителя ISM.10KP.162 на 162.5 МГц мощностью 10 кВт длительностью 300 мс, который был разработан и изготовлен для линейного ускорителя по заказу ОИЯИ, г. Дубна. Усилитель предназначен для линейного усиления моногармонического ВЧ сигнала рабочей частоты в импульсном режиме. Усилитель содержит два основных блока: блок управления и блок усилителя мощности, которые могут размещаться в стандартных стойках 19".

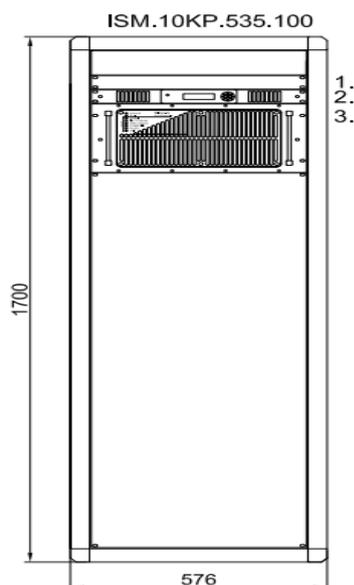
Ключевыми особенностями усилителя ISM.10KP.535.100 являются:

- Полностью транзисторное усиление
- Циркулятор на каждый транзистор
- Естественное воздушное охлаждение всех элементов
- Защита от превышения длительности импульса
- Быстрая защита по отраженной мощности
- Возможность долговременной работы на полностью отражающую нагрузку при любой фазе коэффициента отражения
- Дистанционный контроль и управление (web, SNMP)

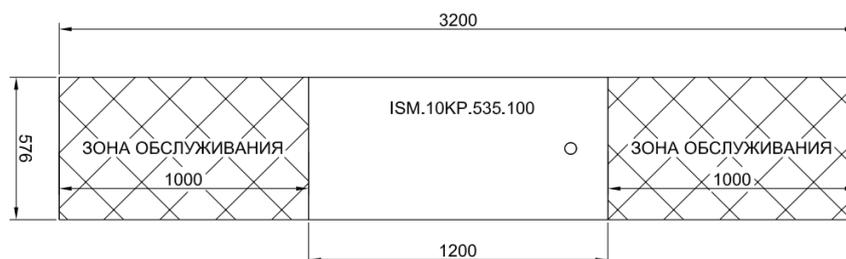
В **Таблице 3.4.4.1** приведены основные технические характеристики усилителя. На **Рисунках 3.4.4.1** и **3.4.4.2** приведены эскизы усилителя. На **Рисунке 3.4.4.3** приведена блок-схема усилителя мощности.

**Таблица 3.4.4.1.** Технические характеристики усилителя мощности ISM.10KP.535.100 для ВЧ питания группирующего резонатора инжектора.

Рабочая частота	530÷540 МГц
Выходная мощность	10 кВт не более 100 мкс
Выходной разъем	7/16 DIN, 50 Ом
Входная мощность	10 мВт
Входной разъем	SMA, 50 Ом
Усиление	60 дБ
Компрессия усиления	3 дБ при 10 кВт
Электропитание	230 В, 50 Гц, 1 ввод
Потребляемая мощность	не более 100 Вт при частоте имп. Менее 1 Гц
Охлаждение	Воздушное
Габариты ГхШхВ	1200x576x1700 мм
Вес	Около 80 кг
Рабочие температуры окружающей среды	+5÷+45°C



**Рисунок 3.4.4.1.** Эскиз усилителя мощности ISM.10KP.535.100 для ВЧ питания группирующего резонатора инжектора (вид спереди). На рисунке цифрами обозначены: 1 – Блок управления, 2 – Блок дистанционного контроля СДК-5, 3 –усилитель 10 кВт.



**Рисунок 3.4.4.2.** Эскиз усилителя мощности ISM.10KP.535.100 для ВЧ питания группирующего резонатора инжектора (вид сверху) и требуемая зона обслуживания.

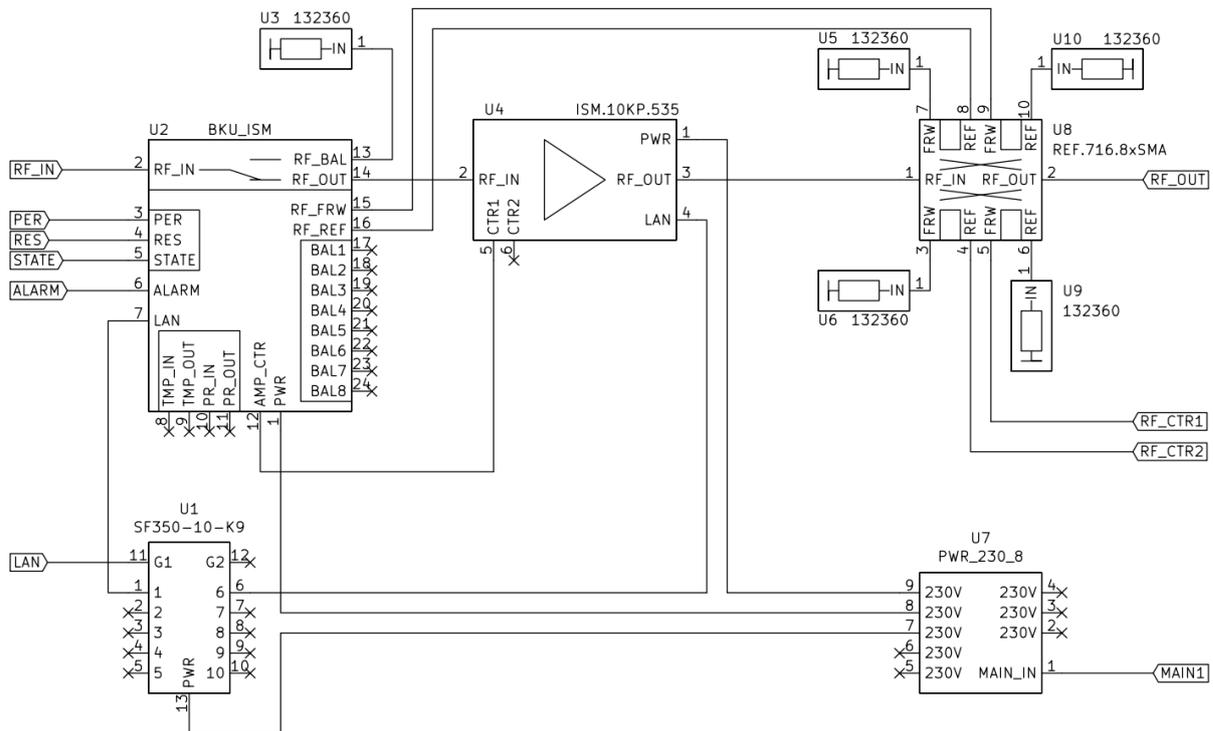
Получая на вход ВЧ сигнал мощностью около 10 мВт и команду «Разрешение работы» +12 В, усилитель ISM.10KP.535.100 отдает с выхода номинальную мощность. Входной ВЧ сигнал усиливается предварительным усилителем и делится, распределяясь по 6-ти усилительным ячейкам. После усиления транзисторными ячейками происходит сложение усиленных сигналов по аналогичной делению схеме.

Прохождение ВЧ сигнала (см. **Рисунок 3.4.4.3**).

1. Вход блока управления (U2, **Рисунок 3.4.4.3**). Измеряется входной уровень мощности. Блокируется ВЧ ключом при внутренних авариях усилителя и при снятии команды «Разрешение работы».
2. Вход блока усилителя мощности (U4, **Рисунок 3.4.4.3**). Производится линейное усиление предварительным каскадом на одном транзисторе. Далее сигнал синфазно делится на 4 и поступает на 4 усилительных ячеек. Каждая усилительная ячейка содержит по 4 транзистора BLF989S. На входе ячейки синфазный делитель на 4. Усиленный сигнал с транзисторов поступает на ВЧ изолятор с балластной нагрузкой, которая принимает на

себя всю мощность рассеивания и отражения. Сигналы с изоляторов суммируются синфазно и поступают на выходной разъем усилительной ячейки. Все ячейки подключаются к синфазному сумматору 4 в 1, на выходе которого установлен рефлектометр и выходной ВЧ разъем.

3. Рефлектометр (U8, **Рисунок 3.4.4.3**). Рефлектометр с регулируемой связью и высокой направленностью. Он имеет 4 независимых зонда с разъемами SMA. Сигналы с двух зондов подаются на блок управления для измерения выходной и отражённой мощностей. Остальные два зонда предназначены для нужд потребителя.



**Рисунок 3.4.4.3.** Блок схема усилителя мощности ISM.10KP.535.100.

Особенности конструкции усилителя ISM.10KP.535.100.

### 3.4.4.1 Блок усилителя мощности

В блоке (поз. 3, **Рисунок 3.4.4.1**) производится линейное усиление предварительным каскадом на одном транзисторе BLF888A. Далее сигнал синфазно делится на 6 и поступает на 6 усилительных ячеек. Каждая усилительная ячейка содержит по 4 транзистора BLF989S. На входе ячейки синфазный делитель на 4. Сдвоенный транзистор имеет симметричное возбуждение. Транзистор работает в классе АВ во время прохождения импульса и переключается в класс С после окончания импульса. Управление напряжением смещения происходит стробирующим сигналом, выделенным из входного сигнала системой защиты. Напряжение питания транзистора составляет 50 В, которые он получает от батареи конденсаторов. Подпитка батареи между импульсами происходит от встроенного источника

питания 50 В. Усиленный сигнал с транзистора поступает на ВЧ изолятор с балластной нагрузкой, которая принимает на себя всю мощность рассогласования и отражения. Циркулятор – производства Valvo, Германия. В линейке циркуляторов Valvo нет модели на нужную частоту, но есть очень близкая по частоте модель VBF1218, на базе которой производитель готов разработать нужное устройство. Сигналы с изоляторов суммируются синфазно и поступают на выходной разъем усилительной ячейки. Все ячейки подключаются к синфазному сумматору 6 в 1, на выходе которого установлен рефлектометр, и выходной ВЧ разъем. Усилитель содержит схему заряда-разряда конденсаторных батарей. В усилителе есть система защиты по входной средней мощности, по перегреву радиатора усилителя, а также измеряются уровни входной, выходной и отраженной пиковых мощностей. Блок имеет связь с блоком системы дистанционного контроля СДК-5 и передает ему все измеренные сигналы и состояние индикации на передней панели. На передней панели расположен светодиодный индикатор, отображающий текущие состояние блока усилителя мощности

#### **3.4.4.2 Блок управления**

Основным блоком, через который пользователи взаимодействуют с усилителем, является блок управления (поз. 1, **Рисунок 3.4.4.1**). Он имеет светодиодный индикатор состояния, символьный индикатор и клавиши навигации по меню. Светодиодный индикатор состояния мигает при поступлении ВЧ импульса. На главной странице символьного индикатора отображается выходная и отраженная мощности в кВт. Перемещаясь по страницам меню, можно считывать основные параметры и изменять режимы работы усилителя.

Блок управления по внешнему сигналу «Разрешение работы» при наличии внутреннего сигнала «Готовность» формирует внутренней сигнал «Разрешение работы» для блоков усилителей мощности, которые, в свою очередь, подают на транзисторы напряжение смещения. При возникновении внутренних аварий блоков усилителей мощности, они снимают напряжение смещения и снимают внутренний сигнал «Готовность» с блока управления. Блок управления меняет статус на «Авария» и снимает внешний сигнал «Готовность». Аварийный модуль фиксирует индикацию аварии. Потребитель, в свою очередь, должен снять внешний сигнал «Разрешение работы» и оценить состояние усилителя. После устранения причины аварии подать кратковременно внешний сигнал «Сброс аварии» и, при необходимости, подать сигнал «Разрешение работы». По внешней команде «Сброс аварии» блок управления меняет статус с «Авария» на «Норма» и приводит индикацию всех блоков в актуальное состояние.

Порядок работы с усилителем с точки зрения пользователя аналогичен описанному выше порядку работы с усилителем ISM.160K.357.

#### **3.4.4.3 Блок дистанционного контроля**

Блок усилителя и блок управления подключаются к блоку системы дистанционного контроля по локальной сети (поз. 2, **Рисунок 3.4.4.1**). На блоке дистанционного контроля работает программное обеспечение, которое опрашивает подключенные блоки, сохраняет в журнал событий все изменения состояний внутренних и внешних сигналов. На встроенном web интерфейсе отображаются все текущие параметры всех блоков. Также можно управлять настройками блока управления. Блок системы мониторинга имеет SNMP агент. Один блок может подключаться сразу к 30 усилителям мощности и к нескольким серверам

дистанционного контроля. Для формирования графиков параметров и архивного хранения сообщений можно использовать серверное программное обеспечение, например, Zabbix, которое имеет открытый исходный код и распространяется бесплатно. Усилитель имеет шаблон для быстрой настройки мониторинга на Zabbix.

Все блоки усилителя питаются от однофазной сети переменного тока 230 В. Встроенные модули имеют активные корректоры коэффициента мощности, поэтому коэффициент мощности усилителя близок к единице.

Планировка генераторного зала инжектора в данном разделе не рассматривается, см. раздел, посвященный ускоряющим структурам линака S-диапазона.

## **3.5 Источники питания магнитов**

### **3.5.1 Источники питания систем линейного ускорителя**

Магнитная система линейного ускорителя содержит фокусирующие соленоиды и квадрупольные линзы, дипольные корректоры, а также, магнит-спектрометр для измерения параметров пучка из ускорителя. Источники питания и их основные характеристики приводятся в **Таблице 3.5.1.1**.

Ниже следует краткое описание источников питания, используемых на линейном ускорителе.

#### **3.5.1.1 MPS-300-24**

На **Рисунке 3.5.1.1** изображена структурная схема источников питания MPS-300-24. Структура источника построена на базе AC/DC модулей RSP-3000-24 с максимальным выходным напряжением 24 V и максимальным выходным током до 125 A. Три таких модуля соединяются параллельно по выходу и охватываются внешней обратной связью по выходному току источника. Разравнивание выходного тока между модулями при параллельном соединении выходов обеспечивается встроенной в них технологией «Current sharing».

Источник собран в 19” корзине высотой 3U и глубиной 480 mm. Основные параметры источника приведены в **Таблице 3.5.1.2**.

Внешний вид источника показан на **Рисунке 3.5.1.2**.

**Таблица 3.5.1.1.** Типы источников питания электромагнитов линака и их основные параметры

#	Наименование, обозначение	Тип источников питания	Кол-во	Ток, А	Напряжение, V	Стабильность
1	Корректоры группировки LN.CBX1-LN.CBX6 LN.CBY1-LN.CBY6	MPS-6-24	12	$\pm 6$	24	$1 \times 10^{-3}$
2	Соленоид группировки LN.SOL1-LN.SOL5	MPS-6-24	5	$\pm 6$	24	$1 \times 10^{-3}$
3	Соленоид предускорителя LN.SOLW1-LN.SOLW2	MPS-300-24	2	300	24	$1 \times 10^{-4}$
4	Соленоид согласующий LN.SOLM	MPS-6-24	1	$\pm 6$	24	$1 \times 10^{-3}$
5	Квадруполь на линаке LN.QFL1-LN.QDL4	MPS-20-50	7	$\pm 20$	50	$1 \times 10^{-3}$
6	Квардуполи у дампа LN.QF4-LN.QF5	MPS-150-24	3	150	24	$1 \times 10^{-4}$
7	Корректоры на линаке LN.CX1-LN.CX4 LN.CY1-LN.CY4	MPS-6-24	8	$\pm 6$	24	$1 \times 10^{-3}$
8	Корректоры на линаке LN.CXY5-LN.CXY7 LN.CXY5-LN.CXY7	MPS-20-50	6	$\pm 20$	50	$1 \times 10^{-3}$
9	Спектрометр LN.BSP	MPS-150-24	3	150	24	$1 \times 10^{-4}$

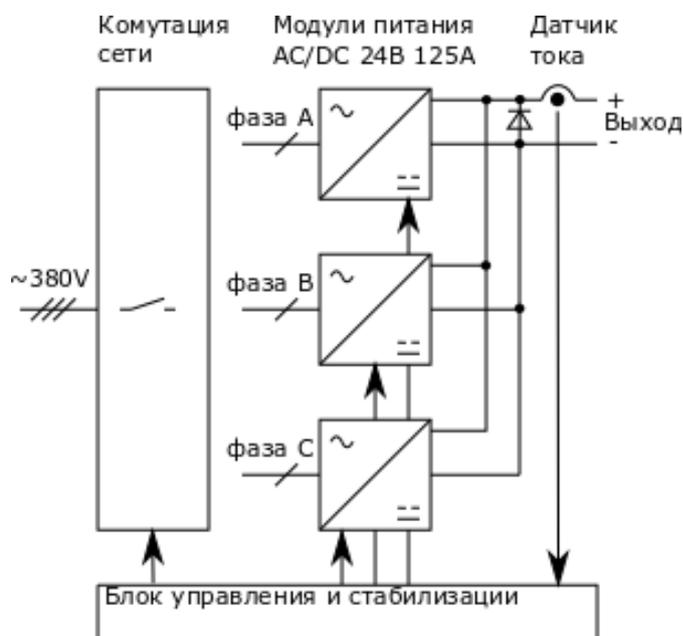
**Рисунок 3.5.1.1.** Структурная схема источников питания MPS-300-24.



Рисунок 3.5.1.2. Внешний вид источника питания MPS-300-24.

### 3.5.1.2 MPS-150-24

Структурная схема источника питания показана на **Рисунке 3.5.1.3**.

**Таблица 3.5.1.2.** Основные параметры источников питания MPS-300-24.

<b>Входные параметры</b>	
Входная силовая сеть	TN-S 380В ±10% 50Гц
Максимальный входной ток (на фазу) (А)	16
КПД	Более 85%
Питание блоков управления	220В ±10% 50Гц
<b>Охлаждение принудительное воздушное</b>	
<b>Выходные параметры</b>	
Выходное напряжение (В)	24
Выходной ток (А)	300
Рабочий диапазон токов	0% ÷ 100%
Абсолютная точность (ppm)	50
Повторяемость тока (ppm)	10
Долговременная стабильность выходного тока в течении 8 часов (ppm) не хуже	±10
Пульсации выходного напряжения (относительно максимального) не более	1%
<b>Управление</b>	
Аналоговое задание тока	0 ÷ 10В
Датчик выходного тока	10В = 100%
Цифровой интерфейс	Ethernet
Задание тока (цифровое)	20бит
Чтение тока (цифровое)	20бит
<b>Механические параметры</b>	
Габаритные размеры (ВхГхШ) (мм)	134 x 480 x 437
Ввод сети	Сзади
Выход	Сзади

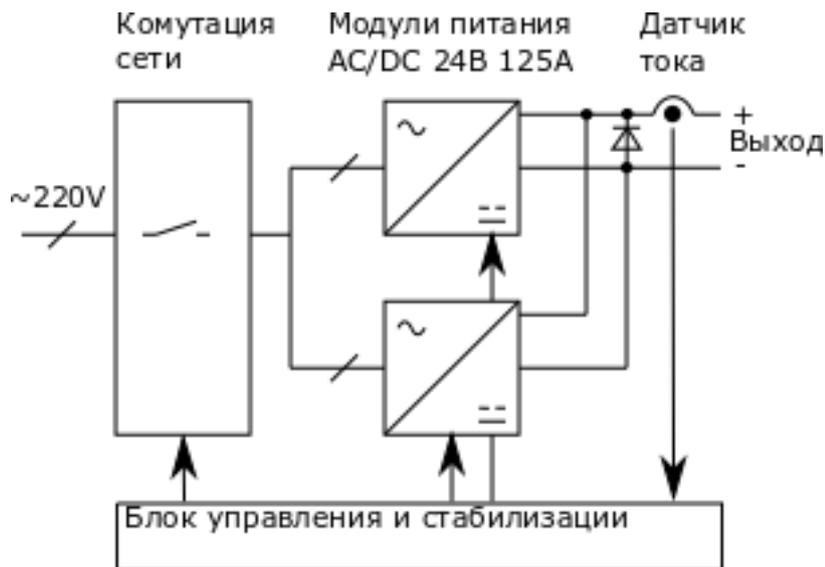


Рисунок 3.5.1.3. Структурная схема источников питания MPS-150-24.

Источник построен на базе AC/DC модулей RSP-3000-24 с выходным напряжением 24 V и выходным током до 125 А. Два таких модуля соединяются параллельно по выходу и охватываются внешней обратной связью по выходному току источника. Разравнивание выходного тока между модулями при параллельном соединении выходов обеспечивается встроенной в них технологией «Current sharing». Источник собран в 19” корзине высотой 2U и глубиной 480 mm. Основные параметры источника приведены в **Таблице 3.5.1.3**.

Внешний вид источника показан на **Рисунок 3.5.1.4**.



Рисунок 3.5.1.4. Внешний вид источника питания MPS-150-24.

### 3.5.1.3 MPS-20-50

Корректирующие магниты питаются от одноканальных четырёхквadrантных источников питания типа MPS-20-50, выполненных в конструктиве «Евромеханика» (**Рисунок 3.5.1.5**) в модульном исполнении (432×355×133 мм<sup>3</sup>).

**Таблица 3.5.1.3.** Основные параметры источников питания MPS-150-24.

<b>Входные параметры</b>	
Входная силовая сеть	Однофазная 220В ±10% 50Гц
Максимальный входной ток (А)	25
КПД	Более 85%
Питание блоков управления	220В ±10% 50Гц
<b>Охлаждение принудительное воздушное</b>	
<b>Выходные параметры</b>	
Выходное напряжение (В)	24
Выходной ток (А)	150
Рабочий диапазон токов	0% ÷ 100%
Абсолютная точность (ppm)	50
Повторяемость тока (ppm)	10
Долговременная стабильность выходного тока в течении 8 часов (ppm) не хуже	±10
Пульсации выходного напряжения (относительно максимального) не более	1%
<b>Управление</b>	
Аналоговое задание тока	0 ÷ 10В
Датчик выходного тока	10В = 100%
Цифровой интерфейс	Ethernet
Задание тока (цифровое)	20бит
Чтение тока (цифровое)	20бит
<b>Механические параметры</b>	
Габаритные размеры (ВхГхШ) (мм)	89 x 480 x 437
Ввод сети	Сзади
Выход	Сзади

**Рисунок 3.5.1.5.** Внешний вид источника питания MPS-20-50.

Основные параметры MPS-20-50 приведены в Таблице 3.5.1.4.

Таблица 3.5.1.4. Параметры MPS-20-50.

Параметры		Значение
$I_{out}$	Выходной ток	$\pm 20$ А
$U_{out}$	Максимальное выходное напряжение	$\pm 50$ В
$f$	Частота преобразования	50 кГц
$X_G$	Абсолютная погрешность регулирования тока	0.1% от $I_{MAX}$
$\sigma$	Дисперсия выходного тока за 10 часов работы	100 ppm от $I_{MAX}$
$\xi$	Пульсации выходного тока	$\leq 0.1\%$
$T_{CI_{out}}$	Температурный дрейф выходного тока	40 ppm/K
$I_{om}$	Гистерезис выходного тока	20 мА
$P_D$	Тепловые потери в модуле	$\leq 150$ Вт

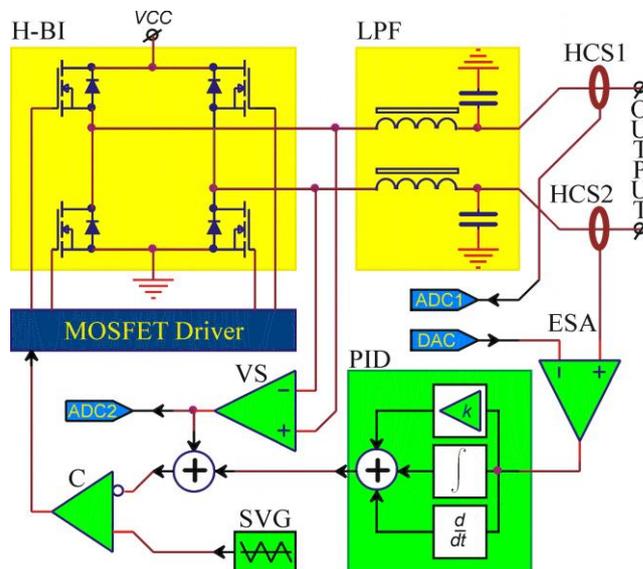


Рисунок 3.5.1.6. Структурная схема усилителя мощности MPS-20. H-BI – мостовой инвертор. LPF – фильтр низких частот. HCS – бесконтактный датчик Холла. PID – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. ADC – аналого-цифровой преобразователь. VS – измеритель напряжения. C – компаратор. ESA – усилитель сигнала ошибки. SVG – генератор напряжения пилообразной формы. DAC – цифро-аналоговый преобразователь.

Питание модуля осуществляется в основном от сети 220/380 В, 50-60 Гц.

В состав модуля входят: импульсный преобразователь из постоянного напряжения в постоянное (DC-DC), источники буферного и вспомогательного питания, а также схема эвакуации энергии, запасённой в индуктивностях обмоток электромагнитов во время работы.

На Рисунке 3.5.1.6 показана структурная схема импульсного преобразователя MPS-20-50 с обратной связью по току. Регулирование выходного тока производится широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения мостового инвертора H-BI, выполненного на современных полевых транзисторах. На выходе мостового инвертора имеется пассивный фильтр второго порядка LPF. Петля обратной связи включает пропорционально-интегрально-

дифференциальный регулятор PID, обеспечивающий необходимую точность регулирования в статическом режиме, а также отсутствие перерегулирования при изменении задания. Для подавления пульсаций питающей сети с частотами 50÷300 Гц вводится более быстрая петля обратной связи по напряжению.

Источник тока снабжён двумя идентичными бесконтактными датчиками тока компенсационного типа (HCS), установленными в выходной цепи (после фильтра). Один из датчиков используется в цепи обратной связи, второй в качестве независимого измерителя для системы контроля.

Система контроля и управления источником тока включает контроллер, имеющий: один ЦАП (для задания тока), два АЦП (для измерения тока и напряжения), трёхбитный регистр ввода (один бит используется для включения буферного питания, второй бит для выключения буферного питания, третий бит используется для аварийного выключения источника тока), четырёхбитный регистр вывода (один бит используется для оповещения системы контроля об ошибке в работе источника тока, три другие бита используются для оповещения о включении буферного питания). В **Таблице 3.5.1.5** перечислены сигналы управления и контроля модуля MPS-20-50.

Ошибка в работе модуля может возникать при замыкании обмотки электромагнита на корпус или при перегреве силовой части модуля MPS-20-50. В случае замыкания обмотки схема защиты блокирует работу мостового преобразователя, выдерживается временная пауза, далее автоматически производится повторный запуск источника тока. При перегреве силовой части источника питания также блокируется работа мостового преобразователя. Повторный запуск производится автоматически, по мере охлаждения силовой части.

Кроме управляющих сигналов контроллера у источника тока MPS-20-50 предусмотрено подключение двух внешних сигналов блокирования работы IN1 и IN2. Необходимость во внешних блокировках может понадобиться при перегреве магнитного элемента, запитанного от MPS-20-50, или при недостаточном давлении охлаждающей жидкости. Для подключения датчиков внешних блокировок используется клеммник, расположенный на задней панели. Рабочему состоянию соответствуют замкнутые контакты клеммника.

На передней панели блока имеются два светодиодных индикатора. Индикатор “POWER ON” информирует о наличии питания мостового инвертора, индикатор “PROTECT” о срабатывании защиты блока. Кроме светодиодных индикаторов на передней панели имеется цифровой светодиодный индикатор выходного тока и напряжения источника MPS-20-50.

Индикатор не является прецизионным измерителем параметров, погрешность измерений индикатора составляет примерно 1%. Он служит исключительно для общей информации о режиме работы блока для обслуживающего персонала. Также на передней панели имеются две кнопки: “ON” и “OFF”, которые служат для включения/выключения буферного питания. Эти кнопки дублируют команды контроллера на включения/выключения буферного источника питания.

**Таблица 3.5.1.5.** Сигналы управления и контроля модуля MPS-20-50.

№	Наименование	Описание	Уровень		
			Min	0	max
1	DAC0	Задание тока	<b>-20 А</b>	<b>0 А</b>	<b>+20 А</b>
			<i>-10 V</i>	<i>0 V</i>	<i>+10 V</i>
2	ADC0	Измерение выходного тока	<b>-20 А</b>	<b>0 А</b>	<b>+20 А</b>
			<i>-10 V</i>	<i>0 V</i>	<i>+10 V</i>
3	ADC1	Измерение выходного напряжения	<b>-100 V</b>	<b>0 V</b>	<b>+100 V</b>
			<i>-10 V</i>	<i>0 V</i>	<i>+10 V</i>
4	OR0	Запрет работы источника питания <sup>1</sup>	<b>Рабочее сост.</b>	<b>Запрет</b>	
			<i>Разомкнуто</i>	<i>Замкнуто</i>	
5	OR1	Включение источника питания <sup>2</sup>	<b>Рабочее сост.</b>	<b>Включение</b>	
			<i>Разомкнуто</i>	<i>Замкнуто</i>	
6	OR2	Выключение источника питания <sup>2</sup>	<b>Рабочее сост.</b>	<b>Выключение</b>	
			<i>Разомкнуто</i>	<i>Замкнуто</i>	
7	IR0	Ошибка работы	<b>Рабочее сост.</b>	<b>Ошибка</b>	
			<i>Лог "0"</i>	<i>Лог "1"</i>	
8	IR1	Состояние источника питания	<b>Включен</b>	<b>Выключен</b>	
			<i>Лог "0"</i>	<i>Лог "1"</i>	
9	IR2	Внешний запрет работы	<b>Запрет работы</b>	<b>Рабочее сост.</b>	
			<i>Лог "0"</i>	<i>Лог "1"</i>	

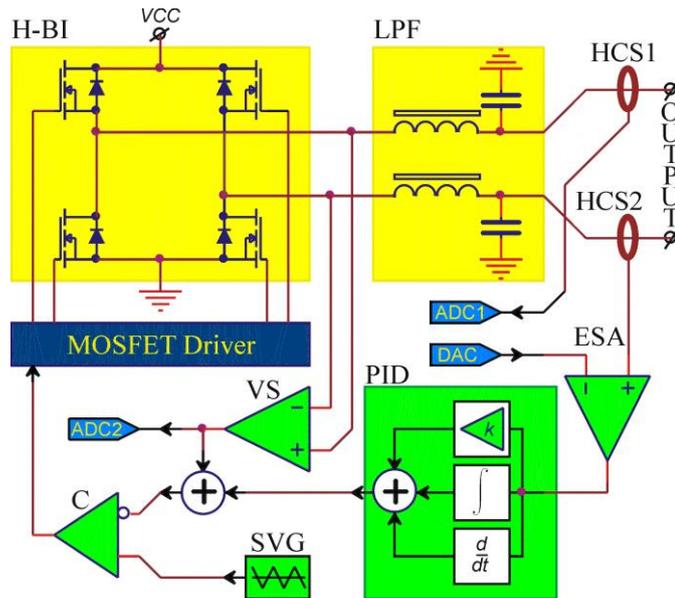
<sup>1</sup> Этот бит используется для запрета выходного тока источника питания. В начальном состоянии данные биты разрешают работу источника питания.

<sup>2</sup> В начальном состоянии источник питания выключен (для включения необходимо произвести запись в соответствующий бит регистра). Далее необходимо перевести этот бит в рабочее состояние. В противном случае система будет игнорировать инверсную команду (одновременная запись битов OR1 и OR2 не имеет смысла).

### 3.5.1.4 MPS-6-24

Одноканальный источник питания MPS-6 (Magnet power supply 6A) предполагается исполнить в виде вставного блока (51×227×266mm<sup>3</sup>) в конструктиве «Евромеханика». Структурная схема MPS-6 изображена на **Рисунке 3.5.1.7**.

Выбор схемного решения определялся возможностью реализовать требуемый алгоритм регулирования выходного тока, имея высокий коэффициент полезного действия (КПД) системы питания. За основу была выбрана структурная схема мостового DC/DC преобразователя. Регулирование выходного тока производится широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения мостового инвертора H-Bridge на частоте 50 kHz. На выходе мостового инвертора имеется фильтр второго порядка LPF, обеспечивающий подавление несущей частоты на 60 dB.



**Рисунок 3.5.1.7.** Структурная схема MPS-6. H-BI – мостовой инвертор. LPF – фильтр низких частот. HCS – бесконтактный измеритель тока. PID – ПИД-регулятор. ADC – АЦП. VS – Датчик напряжения. C – Компаратор. ESA – УСО. SVG – генератор пилообразного напряжения. DAC – ЦАП.

Измерение выходного тока производится двумя идентичными бесконтактными датчиками Холла компенсационного типа LTS 6-NP, производства LEM [20]. Один из датчиков используется в цепи обратной связи, второй – в качестве независимого измерителя для системы контроля. Необходимую точность преобразования обеспечивает петля обратной связи, содержащая звенья с дифференциальными и интегральными характеристиками. Звенья с интегральной характеристикой позволяют получить большой коэффициент усиления сигнала ошибки в системе регулирования с обратной связью в статическом режиме (на энергии инжекции и максимальной энергии бустера). Звенья с дифференциальной характеристикой позволяют избежать перерегулирования выходного тока в режиме ускорения пучка заряженных частиц в бустере.

Параметры MPS-6 приведены в **Таблице 3.5.1.6**, внешний вид изображён на **Рисунке 3.5.1.8**.

Контроль и управление источниками питания MPS-6 предполагается от внешних контроллеров, содержащих цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, а также входные и выходные регистры. Предполагается использовать для контроля и управления источником питания MPS-6 один канал ЦАП, два канала АЦП, один бит входного регистра и один бит выходного регистра дискретных состояний. Сигналы контроля и управления источником питания MPS-6 приведены в **Таблице 3.5.1.7**.

Таблица 3.5.1.6. Параметры MPS-6.

Параметры		Значение
$I_{OUT}$	Выходной ток	$\pm 6$ A
$U_{OUT}$	Максимальное выходное напряжение	$\pm 60$ V
$f$	Частота преобразования	50 kHz
$X_G$	Абсолютная погрешность регулирования тока	0.1 % от $I_{MAX}$
$\sigma$	Дисперсия выходного тока за 10 часов работы	100 ppm от $I_{MAX}$
$\xi$	Пульсации выходного тока	$\leq 0.1$ %
$T\Delta I_{OUT}$	Температурный дрейф выходного тока	50 ppm/K
$I_{OM}$	Гистерезис выходного тока	5 mA
$P_D$	Тепловые потери в блоке	$\leq 15$ W



Рисунок 3.5.1.8. Внешний вид MPS-6.

Многоканальный модуль питания выполнен в виде суб-блока 6U-subunit ( $432 \times 415 \times 266$  мм<sup>3</sup>) в конструктиве «Евромеханика», внешний вид модуля изображён на **Рисунке 3.5.1.9**.

В состав модуля питания входят:

- Источники питания MPS-6 — до 8шт.
- Источники буферного питания — 2шт.
- Источник вспомогательного питания — 1шт.
- Контур рекуперации энергии — 1шт.

Таблица 3.5.1.7. Сигналов управления и контроля источником питания MPS-6.

№	Название	Описание	Уровень		
			min	0	max
1	DAC	Задание тока	<b>-6А</b>	<b>0А</b>	<b>+6А</b>
			<i>-10V</i>	<i>0V</i>	<i>+10V</i>
2	ADC1	Измерение выходного Тока	<b>-6А</b>	<b>0А</b>	<b>+6А</b>
			<i>-10V</i>	<i>0V</i>	<i>+10V</i>
3	ADC2	Измерение выходного напряжения	<b>-100V</b>	<b>0V</b>	<b>+100V</b>
			<i>-10V</i>	<i>0V</i>	<i>+10V</i>
4	OR	Включение/выключение источника питания <sup>1</sup>	<b>Вкл.</b>	<b>Выкл.</b>	
			<i>Замкнуто</i>	<i>Разомкнуто</i>	
5	IR	Ошибка работы источника питания	<b>Рабочее сост.</b>	<b>Ошибка</b>	
			<i>Лог "0"</i>	<i>Лог "1"</i>	

<sup>1</sup>**Примечание.** В начальном состоянии (при включении питания) блоки выключены. Для включения необходимо произвести запись в соответствующий бит регистра.



Рисунок 3.5.1.9. Внешний вид восьмиканального модуля питания.

Источники буферного питания предназначены для формирования постоянного напряжения VCC, которое используется как первичное напряжение питания инверторов MPS-6. В качестве буферных источников питания используются промышленно-выпускаемые импульсные AC/DC преобразователи с коррекцией коэффициента мощности типа PSP-600-12 фирмы Mean Well [21]. Эти преобразователи соединяются последовательно по выходам формируя необходимое напряжение 24 В. Питание преобразователей предполагается выполнить от сети 220/380 VAC, 50 Гц.

Источник вспомогательного питания предназначен для формирования напряжений питания цифровых и аналоговых элементов блоков MPS-6. В качестве такого источника предполагается использовать AC/DC преобразователь типа T-40C фирмы Mean Well.

Для возможности аварийного выключения многоканального модуля питания предусмотрено дополнительное (помимо внешнего контроллера) внешнее управление включением/выключением буферных источников питания. Управляющее устройство должно иметь на выходе гальванически изолированный ключ, способный коммутировать напряжение не менее 15 В, ток не менее 40 мА. Замкнутый ключ соответствует включению источников буферного питания, разомкнутый – выключению. Для возможности внешнего контроля состояния источников буферного питания в модуле имеется гальванически изолированный выходной ключ, способный коммутировать напряжение не менее 28 Впст, ток не менее 2 А. Замкнутый ключ соответствует “буферному питанию в норме”, разомкнутый соответствует “отсутствию буферного питания”.

Все источники питания планируется размещать в шкафах евростандарта. В состав модуля будут входить два шкафа VARISTAR SL размерами 600×1000×2000 (Schroff) с общим замкнутым контуром воздушного охлаждения (**Рисунок 3.5.1.10**). Для охлаждения будет использоваться промышленный воздушно-водяной теплообменник типа PWS 7702 SL производства Pfannenberg.



**Рисунок 3.5.1.10.** Внешний вид модуля.

### 3.5.2 Источники питания магнитов транспортного канала от линака к бустеру

В Таблице 3.5.2.1 перечислены источники питания электромагнитов канала транспортировки пучка от инжекционного комплекса к бустеру.

Таблица 3.5.2.1. Типы источников питания электромагнитов канала транспортировки пучка от инжекционного комплекса к бустеру и их основные параметры.

#	Наименование, обозначение	Тип источников питания	Кол-во	Ток, А	Напряжение, В	Стабильность
1	Дипольные магниты 0.35 м	MPS-20-50	4	$\pm 20$	50	$1 \times 10^{-3}$
2	Квадрупольные линзы 0.3 м	MPS-150-24	9	150	24	$1 \times 10^{-4}$
3	Корректирующие магниты 0.1 м	MPS-20-50	8	$\pm 20$	50	$1 \times 10^{-3}$
4	Впускной септум-магнит BIS.SMP1	100 $\mu$ S, 1 W (1 Hz)	1	2 400	185	$5 \times 10^{-4}$
5	Бамп-магниты	3 mS (1 Hz)	1	1500	800	$5 \times 10^{-4}$
6	Выпускной септум-магнит, импульсный	100 $\mu$ S, 16 W (1 Hz)	1	10 000	550	$5 \times 10^{-4}$

Питание электромагнитов транспортного канала предполагается от источников питания того же типа, что и для линака.

### 3.5.3 Источники питания электромагнитов бустера

В Таблице 3.5.3.1 перечислены параметры электромагнитов бустерного синхротрона.

На Рисунке 3.5.3.1 приведен сценарий задания тока в магнитных элементах бустера. В начальный момент времени расположено плато инжекции пучка в бустер. Ток инжекции составляет примерно 5 % ÷ 10 % от максимального. Длительность плато варьируется от 40 до 100 мс в зависимости от режима работы бустера (инжекция одного или двух сгустков). Потом в течение 360 мс идет нарастание тока до максимума, что соответствует ускорению пучка до энергии 3 ГэВ. Далее расположено плато экстракции в основное кольцо, а затем спад тока и область размагничивания. Пиковое значение энергии потребляется от источника питания при подъёме тока перед плато экстракции. Средняя потребляемая от сети мощность при условии возможности рекуперации энергии из магнитов при спаде тока (т.е. работы источников питания в двухквadrантном режиме) определяется тепловыми потерями на магнитных элементах в течении цикла.

Возможны три пути рекуперации энергии:

- Выделение в виде тепла,
- Отдача энергии обратно в питающую сеть,
- Наличие в составе источника накопителя энергии, способного принять запасенную в магните энергию.

Таблица 3.5.3.1. Параметры электромагнитов бустерного синхротрона.

Тип магнита	Число магнитов	Ток (max)	R, Ом	L, Гн	Напряжение суммарное		Umax	Мощность (пиковая) Вт
					Резистивное	Индуктивное		
BR-BF	28	861	0,0034	0,0011	82,0	94,9	176,8	152'245
BR-BD	32	733	0,0185	0,00973	434	819,3	1 253,3	918'651
BR-QF	8	167	0,030	0,016	48,8	91,2	140	23'380
BR-QD	8	118	0,030	0,016	34,4	64,8	100	11'800
BR-QG	8	105	0,030	0,016	31,2	56,8	88	9'240
BR-SXV	8	5,6	1,2	0,104	6,7	10	16,7	752
BR-SXH	8	5,6	1,2	0,104	6,7	10	16,7	752
BR-CX	20	5	2	0,4	10	40	50	5'000
BR-CY	16	5	2	0,25	10	25	35	1'896
DC SEP	1	430	0,018	0,025	8	-	8	3'440
<b>В сумме</b>								<b>1'127'156</b>

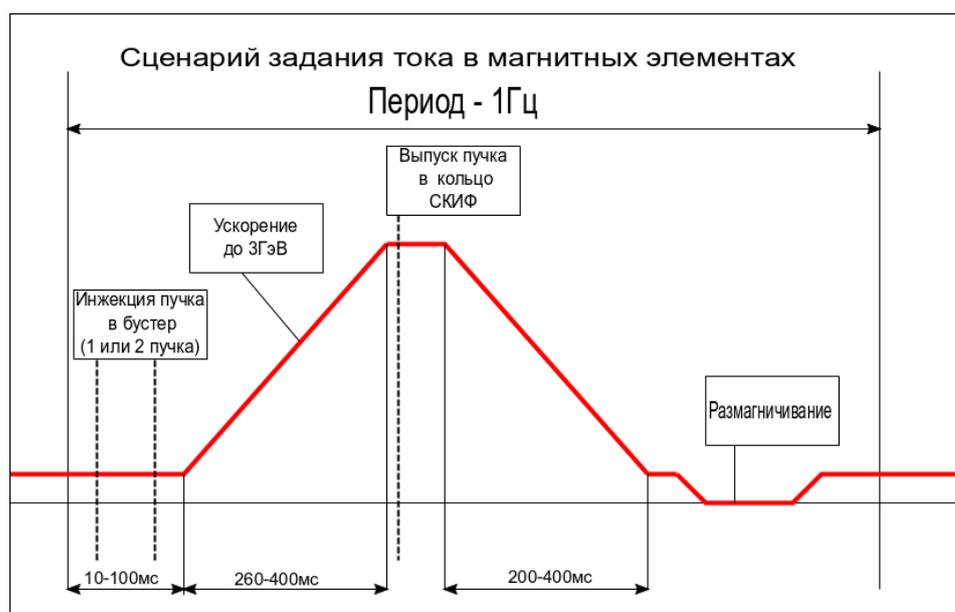
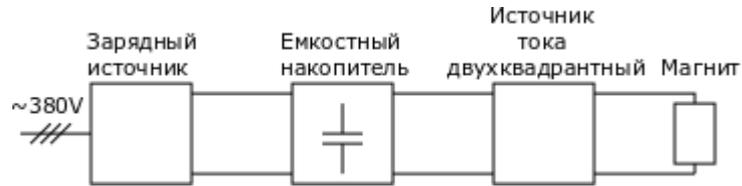


Рисунок 3.5.3.1. Сценарий работы источников питания бустера.

Первый путь имеет крайне низкий КПД, влекущий существенные лишние эксплуатационные расходы, второй вариант потенциально приводит в большим колебаниям потребления мощности, что существенно увеличивает требования на входную сеть и порождает возможную нестабильности сетевого напряжения. Третий вариант позволяет существенно сгладить колебания потребления мощности и существенно уменьшить пиковую потребляемую мощность, так как накопитель энергии позволяет не только рекуперировать энергию и магнита на спаде тока в магнитных элементах, но и является источником энергии на подъеме тока. В качестве накопителя энергии наиболее целесообразно, как с точки зрения стоимости, так и с точки зрения затрат на дальнейшую эксплуатацию использовать емкостные

накопителя на электролитических конденсаторах. На **Рисунке 3.5.3.2** показана блок-схема, предлагаемая для мощных источников питания магнитных элементов бустера, к которым относятся источники питания дипольных магнитов и квадрупольных линз.



**Рисунок 3.5.3.2.** Блок-схема мощных источников питания бустера.



**Рисунок 3.5.3.3.** Диаграммы выходной мощности источника и потребляемой от сети мощности.

На **Рисунке 3.5.3.3** показаны диаграммы выходной мощности источника и мощности, потребляемой источником от сети при использовании емкостного накопителя энергии. Так как вся энергия, запасаемая в магнитном поле, потребляется из накопителя, а из сети только компенсируются резистивные потери на магнитном элементе, то площадь заштрихованная кривой резистивных потерь совпадает с площадью потребляемой от сети мощности. Отсюда следует, что пиковое потребление мощности меньше либо равно мощности резистивных потерь в магните. Таким образом, при применении накопителя достаточной емкости, сопоставимой с энергией, запасаемой в магнитных элементах, питающая сеть должна обладать мощностью, достаточной, чтобы компенсировать резистивные потери в магнитах бустера.

Требуемые параметры источников питания приведены в **Таблице 3.5.3.2**.

**Таблица 3.5.3.2.** Требуемые параметры источников питания бустера.

Тип	Кол-во	Выход. ток, А	Выход. напр., В	Выход. мощность, ВА	Потребляемая мощность, Вт
<b>BR-BF</b>	1	900	200	180 000	80 000
<b>BR-BD</b>	2	750	630	470 000	170 000
<b>BR-QF</b>	1	170	175	29 750	10 000
<b>BR-QD</b>	1	120	175	21 000	10 000
<b>BR-QG</b>	1	110	175	19 250	10 000
<b>BR-SXV</b>	8	6	24	144	60
<b>BR-SXH</b>	8	6	24	144	60
<b>BR-CX</b>	20	6	70	420	60
<b>BR-CY</b>	16	6	70	420	60
<b>DC Septa</b>	1	500	8	4 000	4 000
<b>Кол-во источников</b>	59	Общая потребляемая мощность не более			457 кВт

### 3.5.3.1 Источники питания дипольных магнитов бустера

В бустерном синхротроне используется два типа дипольных магнитов. Параметры магнитов приведены в **Таблице 3.5.3.3**. Магниты каждого семейства соединяются последовательно и запитываются от своего источника питания.

**Таблица 3.5.3.3.** Основные параметры дипольных магнитов.

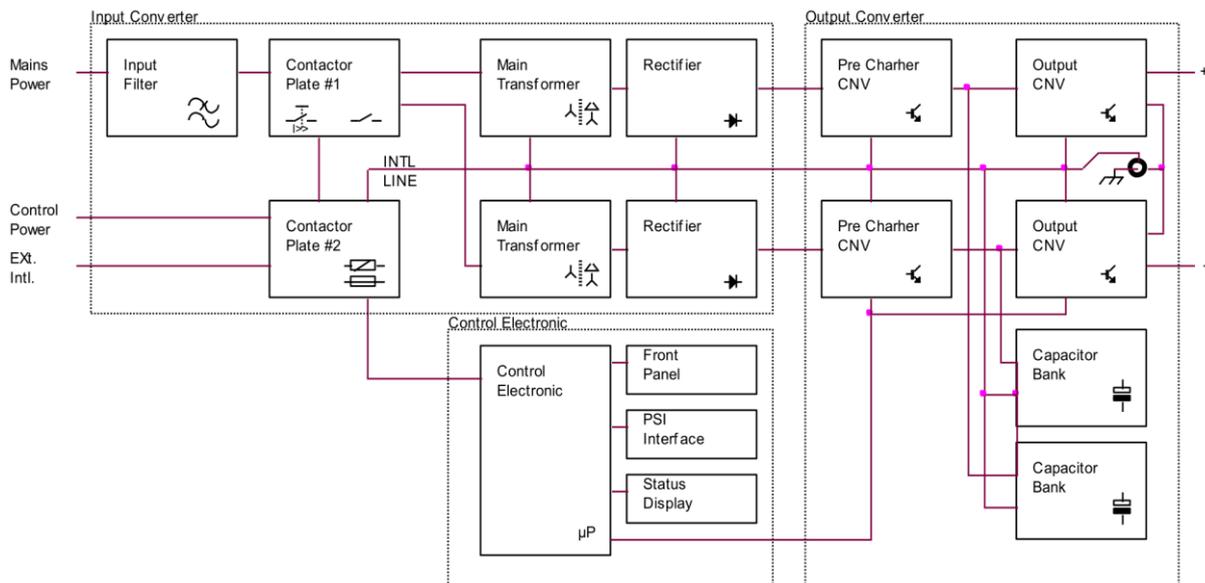
Тип магнита	Кол-во	Ток (max), А	R, мΩ	L, мН	$\Delta V$ активное, В	$\Delta V$ индуктивное, В	Сумм. Напр., В	Пиковая выходная мощность, ВА
<b>BR-BF</b>	28	861	3.4	1.1	82	94.9	176.8	152 245
<b>BR-BD</b>	32	733	18.5	9.7	434	819.3	1253.3	918 651

Ввиду высокого пикового напряжения, возникающего в процессе ускорения на магнитах семейства BR-BD, для его питания используется два источника, отдельно запитывающие два полукольца. Таким образом в бустере используется 3 источника, параметры которых приводятся в **Таблице 3.5.3.4**.

Указанным выше характеристикам удовлетворяют источники питания фирмы **Danfysik** модели «**MODEL 859 Magnet Power Supply**». Структурная схема источников приведена на **Рисунке 3.5.3.4**.

**Таблица 3.5.3.4.** Основные параметры источников питания дипольных магнитов.

Тип источника	BR-BF	BR-BD
Кол-во источников	1	2
Максимальный выходной ток, А	900	750
Выходное напряжение, В	±220	±700
Пиковая выходная мощность, кВт	180	525
Максимальная мощность, потребляемая от сети, кВт	32	96
Сопротивление нагрузки, мОм	95,2	155,2
Индуктивность нагрузки, мГн	30,8	296
Требуемая точность поддержания тока в течении рампы, ppm	±100	±100
Требуемая точность поддержания тока на плато, ppm	±10	±10

**Рисунок 3.5.3.4.** Структурная схема источника питания Danfysik модели 859.

Технические характеристики описаны в **Таблице 3.5.3.5.**

### 3.5.3.2 *Источники питания квадрупольных линз бустера*

В бустерном синхротроне используется 3 типа квадрупольных линз, по 8 штук каждого типа. Линзы каждого типа соединены последовательно и запитываются от своего источника. Таким образом используется 3 источника питания. Параметры системы питания квадрупольных линз приведены в **Таблице 3.5.3.6.**

Структурная схема источника питания показана на **Рисунке 3.5.3.5.** Источник состоит из 10 kW зарядного преобразователя, нагрузкой которого является емкостный накопитель. Номинальное напряжение накопителя 200 В, емкость 150 мФ. От накопителя запитывается двухквадрантный источник тока, построенный на основе мостового преобразователя. За основу взята система квадрупольного питания, разработанная ИЯФ СО РАН для бустера

NSLS-II. Основные характеристики источника питания квадрупольных линз приведены в Таблице 3.5.3.7.

**Таблица 3.5.3.5.** Основные параметры источников питания дипольных магнитов.

Тип источника	BR-BF	BR-BD
<b>Входные параметры</b>		
Входная силовая сеть	TN-S 380 V $\pm$ 10%, 50 Hz	
Максимальный входной ток (на фазу), А	54	128
Тип выпрямителя	12-пульсный	12-пульсный
КПД, %	Более 85	Более 85
Питание блоков управления	220 V $\pm$ 10%, 50 Hz	
Водяное охлаждение (дистиллированная вода)		
Поток (при 3 bar перепаде давления), l/min	31	70
Максимально допустимое давление, bar	15	15
<b>Выходные параметры</b>		
Выходное напряжение, V	$\pm$ 220	$\pm$ 700
Выходной ток, А	900	750
Рабочий диапазон токов, %	0% $\div$ 100	0% $\div$ 100
Абсолютная погрешность, ppm	200	200
Повторяемость тока, ppm	10	10
Допустимая погрешность поддержания тока (треугольная форма тока с острыми углами), ppm	$\pm$ 50	$\pm$ 50
Допустимая погрешность поддержания тока (треугольная форма тока со сглаженными углами), ppm	$\pm$ 10	$\pm$ 10
Максимальная долговременная нестабильность выходного тока в течении 8 h, ppm	$\pm$ 20	$\pm$ 20
Максимальные пульсации выходного напряжения (относительно максимального), %	1	1
<b>Управление</b>		
Аналоговое задание тока, V	0 $\div$ 10	0 $\div$ 10
Датчик выходного тока	10 V = 100 %	10 V = 100 %
Цифровой интерфейс	RS232/RS422	RS232/RS422
Задание тока (цифровое), bit	18	18
Чтение тока (цифровое), bit	16	16
<b>Механические параметры</b>		
Габаритные размеры (ВхГхШ), mm <sup>3</sup>	1800 $\times$ 1050 $\times$ 1836	1800 $\times$ 1050 $\times$ 3672
Ввод сети	Сзади сверху	Сзади сверху
Выход	Сзади сверху	Сзади сверху
Ввод воды	Сзади сверху	Сзади сверху

Таблица 3.5.3.6. Параметры системы квадрупольного питания бустера.

Число и тип последовательно соединенных линз	8 QF	8 QD	8 QG	
Максимальный ток, А	167	118	105	
Сопротивление цепи магнитов, $\Omega$	0.296	0.296	0.296	
Индуктивность цепи магнитов, Н	0.104	0.104	0.104	
Пиковое напряжение при времени подъема/спада тока 0.3 с	На одном магните	13.6	9.6	8.6
	На кабеле (0.1 Ом)	16.7	11.8	10.5
Суммарное пиковое падение напряжения	125	88	78	
Требуемая долговременная нестабильность, %	0.01	0.01	0.01	
Ошибка установки тока при перестройке, %	0.1	0.1	0.1	
Максимальный ток источника, А	180	180	180	
Максимальное напряжение источника, В	$\pm 170$	$\pm 170$	$\pm 170$	



Рисунок 3.5.3.5. Структурная схема источника квадрупольных линз.

### 3.5.3.3 Источники питания секstupольных и дипольных корректоров

Квадратичные нелинейности магнитного поля предполагается корректировать 16-ю секstupольными линзами (8 линз BR-SXV в x-направлении и 8 BR-SXH в y-направлении). Все линзы конструктивно одинаковы. Время перестройки тока в линзе от 0 А до  $I_{\text{MAX}}$  не должно превышать 0.26 с. Типичная временная зависимость тока в линзе от времени приводится на **Рисунках 3.5.3.6** (при этом параметр  $t_0$  может принимать любое значение). Максимальная частота повторения 2 Гц.

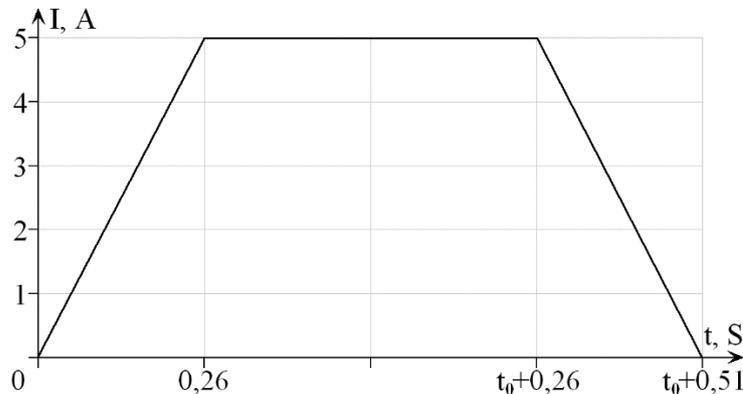


Рисунок 3.5.3.6. Временная зависимость тока в секstupольной линзе бустера.

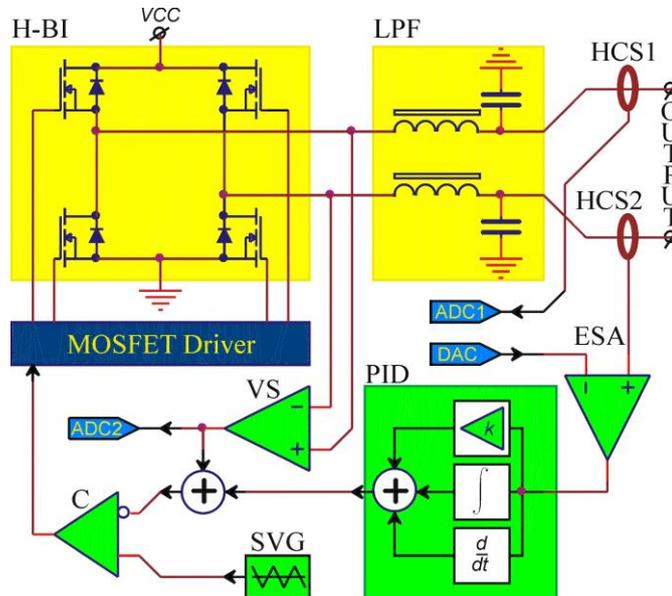
**Таблица 3.5.3.7.** Основные параметры источников питания квадрупольных линз.

Тип источника	QF/QD/QG
<b>Входные параметры</b>	
Входная силовая сеть	TN-S 380 В $\pm 10\%$ , 50 Гц
Максимальный входной ток (на фазу), А	20
КПД, %	Более 90
Питание блоков управления	220 В $\pm 10\%$ , 50 Гц
<b>Водяное охлаждение (дистиллированная вода)</b>	
Поток (при 3 bar перепаде давления), л/мин	5
Максимально допустимое давление, бар	10
<b>Выходные параметры</b>	
Выходное напряжение, В	$\pm 170$
Выходной ток, А	180
Рабочий диапазон токов	0% $\div$ 100%
Абсолютная погрешность, ppm	200
Повторяемость тока, ppm	100
Допустима погрешность поддержания тока (треугольная форма тока с острыми углами), ppm	$\pm 500$
Допустимая погрешность поддержания тока (треугольная форма тока со сглаженными углами), ppm	$\pm 100$
Максимальная долговременная стабильность выходного тока в течении 8 ч, ppm	$\pm 100$
Максимальные пульсации выходного напряжения (относительно максимального), %	1
<b>Управление</b>	
Аналоговое задание тока, В	0 $\div$ 10
Датчик выходного тока	10 В = 100 %
Цифровой интерфейс	Ethernet
Задание тока (цифровое), bit	20
Чтение тока (цифровое), bit	20
<b>Механические параметры</b>	
Габаритные размеры (ВхГхШ), мм	1800 $\times$ 800 $\times$ 600
Ввод сети	Сзади сверху
Выход	Сзади сверху
Ввод воды	Сзади снизу

Коррекцию равновесной орбиты бустера предполагается осуществлять 36-ю дипольными корректорами (20 корректоров BR-CX в x-направлении и 16 корректоров BR-CY в y-направлении). Все дипольные корректоры имеют одинаковую конструкцию. Временная диаграмма перестройки тока источников питания аналогична диаграмме источников питания дипольных магнитов, за исключением интервала подъема тока: для возможности динамической коррекции дипольной составляющей магнитного поля на этом участке

необходимо обеспечить регулирование выходного тока на частоте до 3-й гармоники основного поля.

Одноканальный источник питания MPS-6 (Magnet power supply 6A) предполагается исполнить в виде вставного блока ( $51 \times 227 \times 266$  мм<sup>3</sup>) в конструктиве «Евромеханика». Структурная схема MPS-6 изображена на **Рисунке 3.5.3.7**.



**Рисунок 3.5.3.7.** Структурная схема MPS-6. Здесь: H-BI – мостовой инвертор, LPF – фильтр низких частот, HCS – бесконтактный измеритель ток, PID – ПИД-регулятор, ADC – АЦП, VS – датчик напряжения, C – компаратор, ESA – УСО, SVG – генератор пилообразного напряжения, DAC – ЦАП.

Выбор схемного решения определялся возможностью реализовать требуемый алгоритм регулирования выходного тока, имея высокий коэффициент полезного действия (КПД) системы питания. За основу была выбрана структурная схема мостового DC/DC преобразователя. Регулирование выходного тока производится широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения мостового инвертора H-Bridge на частоте 50 kHz. На выходе мостового инвертора имеется фильтр второго порядка LPF, обеспечивающий подавление несущей частоты на 60 dB.

Измерение выходного тока производится двумя идентичными бесконтактными датчиками Холла компенсационного типа LTS 6-NP, производства LEM (<http://www.lem.com>). Один из датчиков используется в цепи обратной связи, второй – в качестве независимого измерителя для системы контроля. Необходимую точность преобразования обеспечивает петля обратной связи, содержащая звенья с дифференциальными и интегральными характеристиками. Звенья с интегральной характеристикой позволяют получить большой коэффициент усиления сигнала ошибки в системе регулирования с обратной связью в статическом режиме (на энергии инжекции и максимальной энергии бустера). Звенья с дифференциальной характеристикой позволяют избежать перерегулирования выходного тока в режиме ускорения пучка заряженных частиц в бустере.

Параметры MPS-6 приведены в **Таблице 3.5.3.8**, внешний вид изображён на **Рисунке 3.5.3.8**.

**Таблица 3.5.3.8.** Параметры MPS-6.

Параметры		Значение
$I_{out}$	Выходной ток	$\pm 6$ А
$U_{out}$	Максимальное выходное напряжение	$\pm 60$ В
$f$	Частота преобразования	50 кГц
$X_G$	Абсолютная погрешность регулирования тока	0.1 % от $I_{MAX}$
$\sigma$	Дисперсия выходного тока за 10 часов работы	100 ppm от $I_{MAX}$
$\xi$	Пульсации выходного тока	$\leq 0.1$ %
$TCI_{out}$	Температурный дрейф выходного тока	50 ppm/К
$I_{om}$	Гистерезис выходного тока	5 мА
$P_D$	Тепловые потери в блоке	$\leq 15$ Вт



**Рисунок 3.5.3.8.** Внешний вид MPS-6.

Контроль и управление источниками питания MPS-6 предполагается от внешних контроллеров, содержащих цифроаналоговые и аналогоцифровые преобразователи, а также входные и выходные регистры. Предполагается использовать для контроля и управления источником питания MPS-6 один канал ЦАП, два канала АЦП, один бит входного регистра и один бит выходного регистра дискретных состояний. Сигналы контроля и управления источником питания MPS-6 приведены в **Таблице 3.5.3.9**.

Таблица 3.5.3.9. Сигналов управления и контроля источником питания MPS-6.

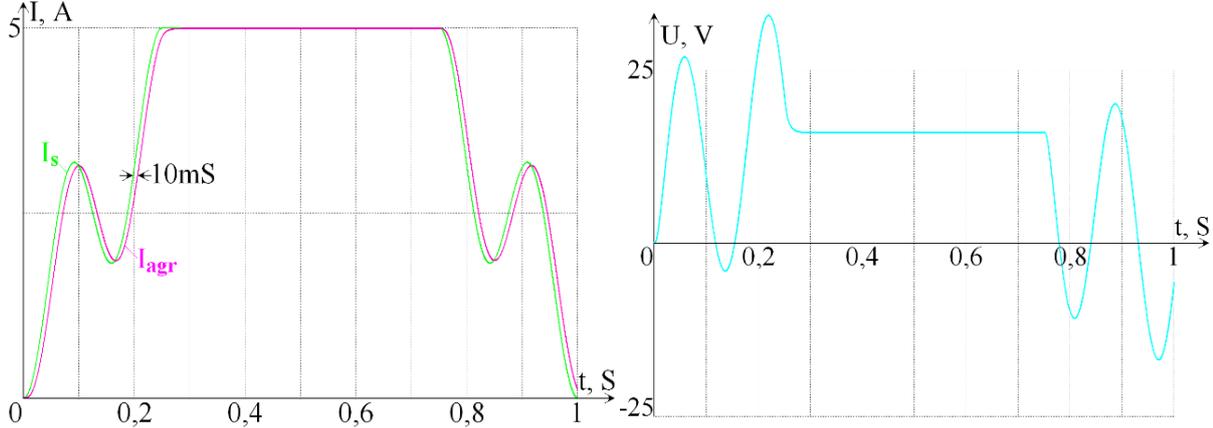
№	Название	Описание	Уровень		
			min	0	max
1	DAC	Задание тока	<b>-6 А</b>	<b>0 А</b>	<b>+6 А</b>
			<i>-10 В</i>	<i>0 В</i>	<i>+10 В</i>
2	ADC1	Измерение выходного Тока	<b>-6 А</b>	<b>0 А</b>	<b>+6 А</b>
			<i>-10 В</i>	<i>0 В</i>	<i>+10 В</i>
3	ADC2	Измерение выходного напряжения	<b>-100 В</b>	<b>0 В</b>	<b>+100 В</b>
			<i>-10 В</i>	<i>0 В</i>	<i>+10 В</i>
4	OR	Включение/выключение источника питания <sup>1</sup>	<b>Вкл.</b>	<b>Выкл.</b>	
			<i>Замкнуто</i>	<i>Разомкнуто</i>	
5	IR	Ошибка работы источника питания	<b>Рабочее сост.</b>	<b>Ошибка</b>	
			<i>Лог "0"</i>	<i>Лог "1"</i>	

<sup>1</sup>**Примечание.** В начальном состоянии (при включении питания) блоки выключены. Для включения необходимо произвести запись в соответствующий бит регистра.

На **Рисунке 3.5.3.9** приводится временная зависимость выходного тока и напряжения источников питания корректоров (данные получены при помощи моделирования). Как видно из графика, кривая измеренного значения тока по форме повторяет кривую заданного значения тока; между кривыми наблюдается постоянный временной сдвиг, примерно равный 10 мс. Этот сдвиг соответствует временным параметрам петли обратной связи и мало зависит от параметров нагрузки. Константы регулирования выходного тока подобраны таким образом, что система с обратной связью находится в области устойчивости как для дипольных корректоров, так и для секступолей, что позволяет изготавливать одинаковые источники питания для всех корректоров.

Проделанные оценки показали, что ошибка регулирования выходного тока составляет не более 0,1% в статическом режиме, и не более 1% в режиме перестройки.

Мгновенная выходная мощность источника питания может принимать положительное и отрицательное значение (на **Рисунке 3.5.3.9** ток положительный, напряжение отрицательное). Поэтому для корректоров необходим источник питания с четырёхквadrантной вольтамперной характеристикой. Такой источник в режиме уменьшения выходного тока позволяет отбирать часть энергии, запасённой в индуктивности нагрузки. Отобранная от нагрузки энергия запасается в буферной ёмкости  $C_{buf}$ . Для многоканальной системы питания оптимальней использовать общую буферную ёмкость на несколько каналов питания в пределах одного многоканального модуля.



**Рисунок 3.5.3.9.** Временная зависимость выходного тока и напряжения источников питания корректоров.  $I_s$  – Заданное значение тока (сигнал ЦАП),  $I_{agr}$  – измеренное значение тока (сигнал LEM-датчика).



**Рисунок 3.5.3.10.** Внешний вид восьмиканального модуля питания.

Многоканальный модуль питания выполнен в виде суб-блока 6U-subunit ( $432 \times 415 \times 266$  мм<sup>3</sup>) в конструктиве «Евромеханика», внешний вид модуля изображён на **Рисунке 3.5.3.10**. В состав модуля питания входят:

- Источники питания MPS-6 – до 8шт.
- Источники буферного питания – до 3шт.
- Источник вспомогательного питания – 1шт.
- Буферная ёмкость  $C_{buf}$  – 1шт.

Источники буферного питания предназначены для формирования постоянного напряжения  $V_{CC}$ , которое используется как первичное напряжение питания инверторов MPS-6. В качестве буферных источников питания используются промышленно-выпускаемые импульсные AC/DC преобразователи с коррекцией коэффициента мощности типа PSP-600-24 фирмы Mean Well [22]. Питание этих преобразователей предполагается выполнить от сети 220/380 VAC, 50 Hz; схема подключения приводится на **Рисунке 3.5.3.11**. Такое включение

обеспечивает одинаковое потребление мощности от сети всеми буферными источниками питания. При этом не будет тока в “нулевом” проводе.

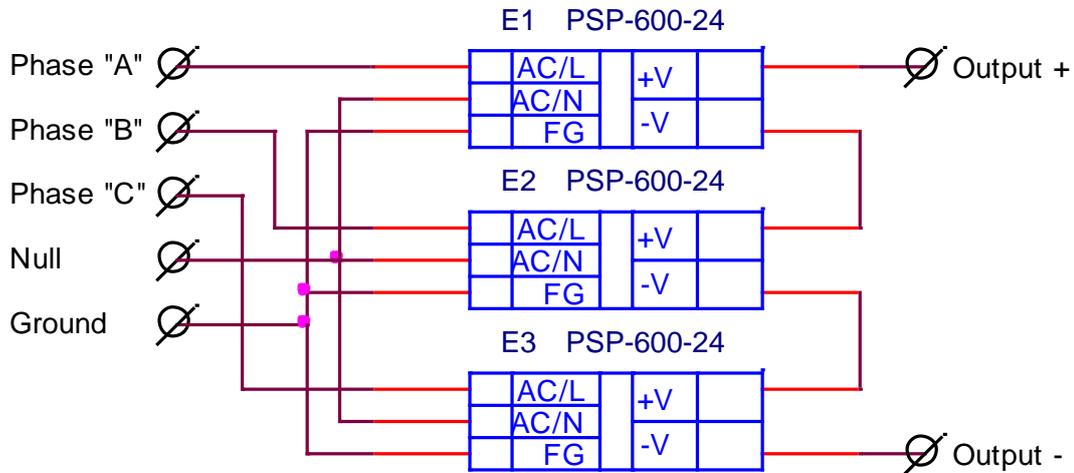


Рисунок 3.5.3.11. Схема подключения источников буферного питания.

Источник вспомогательного питания предназначен для формирования напряжений питания цифровых и аналоговых элементов блоков MPS-6. В качестве такого источника предполагается использовать AC/DC преобразователь типа T-40C фирмы Mean Well.

Для возможности аварийного выключения многоканального модуля питания предусмотрено дополнительное (помимо внешнего контроллера) внешнее управление включением/выключением буферных источников питания. Управляющее устройство должно иметь на выходе гальванически изолированный ключ, способный коммутировать напряжение не менее 15 В, ток не менее 40 мА. Замкнутый ключ соответствует включению источников буферного питания, разомкнутый – выключению. Для возможности внешнего контроля состояния источников буферного питания в модуле имеется гальванически изолированный выходной ключ, способный коммутировать напряжение не менее 28 VDC, ток не менее 2 А. Замкнутый ключ соответствует «буферному питанию в норме», разомкнутый соответствует «отсутствию буферного питания». В многоканальном модуле предусмотрено измерение параметров буферного питания. Для этого планируется использовать два канала АЦП, для измерения величины буферного напряжения и тока. Величина буферной ёмкости составляет 50 мФ. При этом значении ёмкости максимальная величина буферного напряжения 70 В, что вполне допустимо.

### 3.5.4 Источники питания магнитов транспортного канала от бустера к накопителю

В Таблице 3.5.4.1 перечислены источники питания электромагнитов канала транспортировки пучка от бустера к основному кольцу.

**Таблица 3.5.4.1.** Типы источников питания электромагнитов канала транспортировки пучка от бустера к основному кольцу и их основные параметры.

#	Наименование, обозначение	Тип источников питания	Кол-во	Ток, А	Напряжение, В	Стабильность
1	Дипольные магниты	IT6045D-80-1080	3	1080	80	$1 \times 10^{-4}$
2	Квадрупольные линзы QFA, 0.3m	MPS-300-24	12	300	24	$1 \times 10^{-4}$
3	Квадрупольные линзы 0,3 m	MPS-150-24	14	150	24	$1 \times 10^{-4}$
4	Корректирующие магниты	MPS-6-60	22	$\pm 6$	60	$1 \times 10^{-3}$
5	Выпускной септум-магнит, постоянный	MPS-300-24	1	300	24	$1 \times 10^{-4}$
6	Впускной септум-магнит, постоянный	MPS-300-24	1	300	24	$1 \times 10^{-4}$
7	Септум-магнит Ламбертсона	MPS-150-24	1	135	11	$1 \times 10^{-4}$

Питание электромагнитов транспортного канала предполагается выполнить от источников того же типа, которые использовались для питания линака.

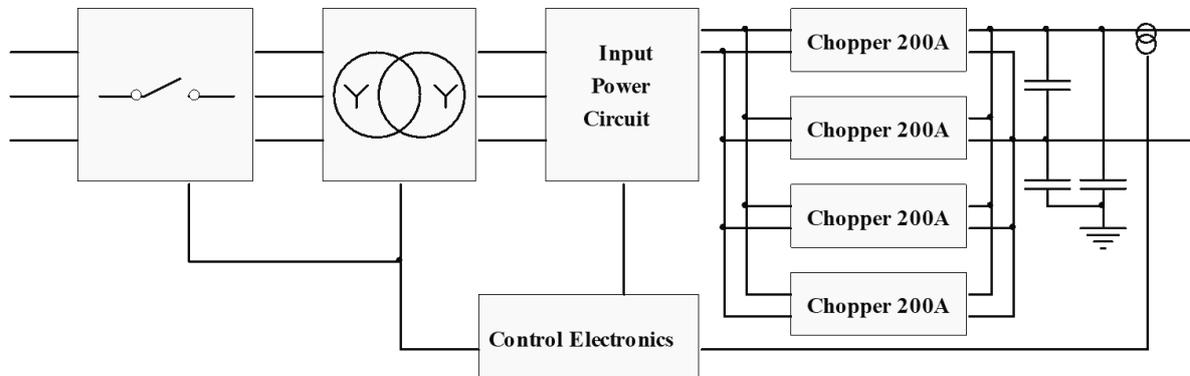
### 3.5.5 Источники питания электромагнитов основного кольца

В Таблице 3.5.5.1 перечислены источники питания электромагнитов основного кольца.

#### 3.5.5.1 Источники питания дипольных магнитов

Дипольные магниты одного семейства запитываются последовательно от одного источника питания. Поэтому для питания дипольных магнитов накопителя достаточно трех источников питания. Предполагается использовать однотипные источники питания, поэтому далее будет описываться самый мощный источник питания семейства магнитов BDA.

Источник питания работает в статическом режиме с медленным изменением выходного тока. На Рисунке 3.5.5.1 приведена структурная схема источника питания. На Рисунке 3.5.5.2 показана функциональная схема цепи ввода мощности.



**Рисунок 3.5.5.1.** Структурная схема источника питания.

**Таблица 3.5.5.1.** Типы источников питания электромагнитов основного кольца и их основные параметры.

#	Наименование	Обозначение	Тип источников питания	Кол-во	Ток, А	Напряжение, В	Стабильность
1	Дип.корректоры постоянных магнитах ВРС	0.21 м	GSP10-1000-3P400	16	1000	10	$5 \times 10^{-4}$
2	Дипольные магниты	32 шт. BDC, 0.47 м	PS-MR-BDC	1	600	375	$5 \times 10^{-5}$
		32 шт. BMA, 0.69 м	PS-MR-BMA	1	600	375	$5 \times 10^{-5}$
		64 шт. BDA, 1.3 м	PS-MR-BDA	1	800	375	$5 \times 10^{-5}$
3	Квадруполи	QFA, 0.3 м	MPS-300-24	32	300	24	$1 \times 10^{-4}$
		QDA, 0.3 м	MPS-300-24	32	300	24	$1 \times 10^{-4}$
		32 шт. AFA, 0.15 м	MPS-300-24	128	300	30	$5 \times 10^{-5}$
		32 шт. AFC, 0.15 м	MPS-300-24	32	300	30	$5 \times 10^{-5}$
		QFB, 0.15 м	MPS-300-24	32	300	24	$1 \times 10^{-4}$
4	Секступоли	SFA, 0.15 м	MPS-150-24	32	150	24	$1 \times 10^{-4}$
		SD*, 0.25 м	MPS-150-24	160	150	24	$1 \times 10^{-4}$
		SFB & SFC, 0.3 м	MPS-150-24	64	150	24	$1 \times 10^{-4}$
5	Корр.обмотки сектступолях	на каждом полюсе по обмотке	MPS-3-24	1 536	$\pm 3$	24	$5 \times 10^{-4}$
6	Дип.корректоры магнитах ВМА	на каждом полюсе по обмотке	MPS-3-24	32	$\pm 3$	24	$5 \times 10^{-4}$
7	Дипольные корректоры прямолинейных промежутках	CX	MPS-25-50	32	$\pm 25$	50	$5 \times 10^{-4}$
8	Дипольные корректоры прямолинейных промежутках	CY	MPS-25-50	32	$\pm 25$	50	$5 \times 10^{-4}$
9	Корректоры прямолинейных промежутках	Skew	MPS-25-50	32	$\pm 25$	50	$5 \times 10^{-4}$

Состав преобразователя:

- Входной силовой трансформатор со схемой включения и цепью контроля нагрева обмоток;
- Входная зарядная цепь, состоит из цепи плавной зарядки конденсаторных батарей и силового выпрямителя;
- Четыре включенных параллельно преобразовательных модулей идентичной конструкции, представляющих собой конденсаторную батарею, понижающий преобразователь на IGBT и выходной LC фильтр;
- Выходная суммирующая цепь с измерителем тока;
- Система управления и защиты.

В **Таблицах 3.5.5.2 – 3.5.5.4** приведены параметры питающей сети, преобразователя мощности и нагрузки.

Расчет трансформатора основан на определении максимального выходного напряжения и максимального выходного тока преобразователя мощности.

Напряжение нагрузки номинальное 256 В. Учитывая коэффициенты для просадки напряжения сети – 1,15; для перегрева нагрузки ( $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ ) – 1,04; для запаса по току – 1,05; для запаса по регулированию – 1,05; коэффициент падения на шинопроводе - 1,05; также необходимо учесть величину падения напряжений на элементах внутренней цепи преобразователя – оценим ее приблизительно как 10 В. Общий коэффициент

$$U_{out} = U_n \cdot 1,15 \cdot 1,04 \cdot 1,05 \cdot 1,05 \cdot 1,05 + 10V \approx 396V$$

Тогда напряжение вторичных обмоток трансформатора составит 170 В (действующее значение). Ток вторичных обмоток 630 А при номинальном выходном токе, 695 А при максимальном выходном токе. Параметры рассчитанного трансформатора приведены в **Таблице 3.5.5.5**.

Цепь ввода является схемой включения силовой цепи и схемой плавной зарядки батарей электролитических конденсаторов, установленных в преобразовательных модулях. Также цепь ввода содержит силовой диодный выпрямитель и элементы системы управления и защиты силового преобразователя.

При плавной зарядке батарей электролитических конденсаторов ток заряда формируется отдельной зарядной цепью, по достижении напряжением батареи пороговой величины 360 В происходит включение силового контактора, при этом система плавной зарядки отключается. Система управления и защиты выполняет функцию контроля температуры обмоток силового трансформатора, контроль напряжений и токов фаз, контроль перегрева и протока воды в охладителе силового выпрямительного моста и измерение выходного напряжения выпрямительного моста.

**Таблица 3.5.5.2.** Параметры питающей сети.

Входная силовая питающая сеть	3-х фазная 50 Гц
Напряжение входной сети	230/400 В
Допустимая просадка напряжения сети, не более	15%
Сеть питания системы управления и защиты	3-х фазная, 50 Гц
Мощность, потребляемая системой управления, не более	1 кВА
Допустимая просадка напряжения сети, не более	15%

**Таблица 3.5.5.3.** Параметры нагрузки.

Количество магнитов	64
Сопротивление каждого магнита при 25°C	5,7 мОм
Полное сопротивление магнитов, при 25°C	364,8 мОм
Полное падение напряжения на магнитах при номинальном токе, при 25°C	280 В
Перегрев магнитов при работе, не более	10°C

**Таблица 3.5.5.4.** Параметры преобразователя мощности.

Мощность, потребляемая от силовой сети, не более	330 кВА
Мощность требуемого силового трансформатора	400 кВА
Выходное напряжение преобразователя, не более	375 В
Выходной ток преобразователя, номинальный	768 А
Выходной ток преобразователя, максимальный	800 А
Точность установки выходного тока, не хуже	$5 \times 10^{-5}$
Величина пульсаций выходного тока для индуктивной нагрузки, не более	$1 \times 10^{-5}$
Скорость изменения тока на выходе преобр.в рабочем режиме, не более	100А/с
Потери в преобразователе, не более	13 кВт
Потери в водяной системе охлаждения, не более	10 кВт
Требуемая мощность системы водяного охлаждения, не менее	15 л/мин.
Рабочее давление в системе водяного охлаждения, не более	8 атм.

**Таблица 3.5.5.5.** Расчетные параметры трансформатора.

Габаритная мощность трансформатора	400 кВА
Напряжение первичных обмоток	230/400 В
Напряжение вторичных обмоток,	170/295 В
Ток первичной обмотки, действующий	514 А
Ток вторичной обмотки максимальный, действующий	695 А
Тепловые потери в трансформаторе, не более	5 кВт

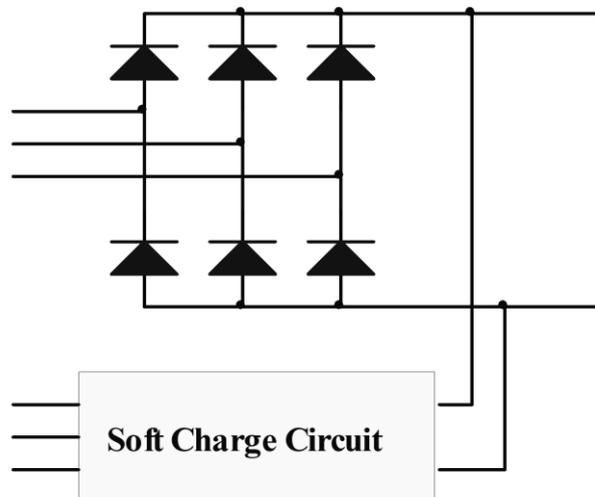


Рисунок 3.5.5.2. Функциональная схема цепи ввода мощности.

Преобразовательный модуль построен по классической топологии понижающего преобразователя. Входная емкость – четыре конденсатора каждый защищен с помощью плавкого предохранителя и оснащенный цепью быстрого разряда при аварийном открывании дверей шкафа. В качестве силового транзистора предлагается использовать параллельное включение двух SKM600GAR12T4, для уменьшения потерь. Преобразовательный модуль оснащен собственным измерителем тока для контроля и ограничения величины выходного тока. На **Рисунке 3.5.5.3** показана функциональная схема преобразовательного модуля

Схема предусматривает параллельное включение четырех идентичных преобразовательных модулей. Параметры преобразовательного модуля приведены в **Таблице 3.5.5.6**.

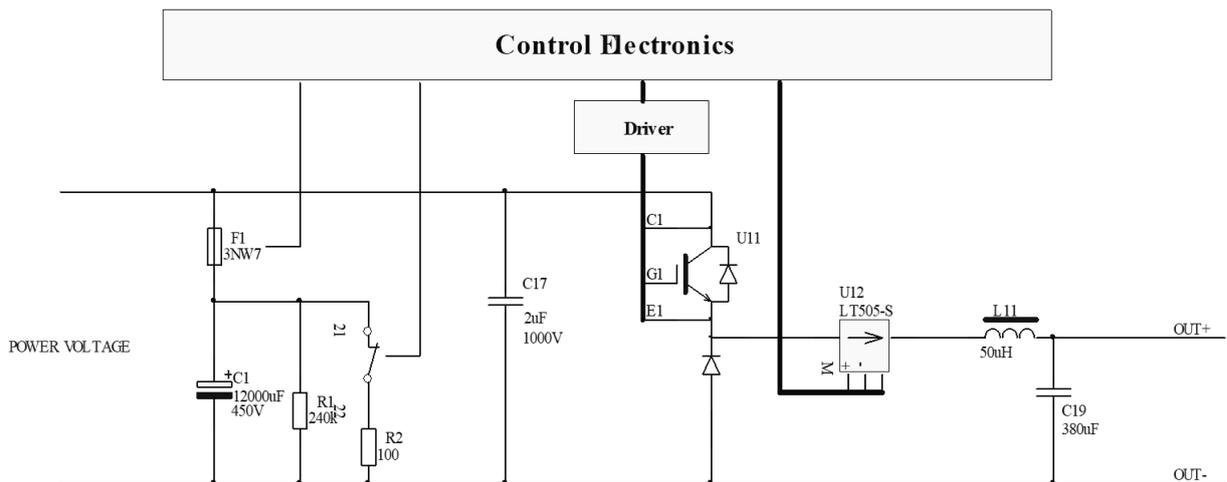


Рисунок 3.5.5.3. Функциональная схема преобразовательного модуля.

**Таблица 3.5.5.6.** Параметры преобразовательного модуля.

Максимальный выходной ток	200 А
Максимальное входное напряжение	400 В
Максимальная частота ШИМ преобразователя	20 кГц
Частота среза выходного LC фильтра	1290 Гц
Тип охлаждения элементов силовой цепи	водяное
Скорость протока воды в системе охлаждения, не менее	3 л/мин

Система управления и защиты модуля состоит из преобразователя из оптический в электрический для ШИМ сигнала, драйвера IGBT и системы защиты. Система защиты обрабатывает следующие состояния модуля преобразователя:

- Блокировка драйвера IGBT (нарушение в цепи питания или не насыщение коллектора);
- Наличие достаточного протока воды в системе охлаждения (турбинный датчик протока);
- Перегрев элементов силовой цепи выше 70°C (биметаллические релейные датчики);
- Превышение выходного тока модуля (датчик на основе элемента Холла);
- Выход из строя защитного предохранителя электролитического конденсатора (x4);
- Срабатывание разрядной цепи вследствие открытия дверей силового шкафа.

Светодиоды местной индикации отображают состояние блокировок и рабочего режима модуля. При возникновении любой из блокировок, импульсы управления затворами IGBT обнуляются.

Перегрев охлаждающей воды составит примерно 10°C.

Выходная цепь представляет собой суммирующий шинопровод с ЕМI фильтром и измеритель выходного тока.

В качестве измерителя тока выбран DCCT типа IT 1000-S/SP1 ULTRASTAB. Шунтовой резистор типа Y092610R0000T9L, устанавливается на охладитель для обеспечения требуемых параметров точности измерений тока нагрузки. В **Таблице 3.5.5.7** приведены параметры измерителя тока и шунтового резистора.

**Таблица 3.5.5.7.** Параметры измерителя тока и шунтового резистора.

Максимальный измеряемый ток	1000 А
Коэффициент преобразования	1:1000
Предельная точность измерения тока	$1 \times 10^{-5}$
Величина шунтового резистора	10 Ом
Отклонение величины сопротивления	0,01%
Температурный коэффициент сопротивления резистора	0,2 ppm/°C
Мощность выделяющаяся на резисторе	6,5 Вт
Допустимый перегрев резистора при сохранении требуемой точности измерений, не более	20°C

Расчетная площадь охладителя шунтового резистора составляет не менее 265 см<sup>2</sup>. Резистор шунта и остальная электроника управления размещена в модуле конструктива евромеханика. В выходной цепи также контролируются нарушения изоляции нагрузки и установлен ЕМС фильтр.

Система управления и защиты выполняет функцию формирования управляющего сигнала для преобразовательных модулей, опрашивает состояния датчиков блокировок и выдает разрешения на включение преобразователя. Составной частью системы управления и защиты являются модули связи с общей системой управления комплекса.

Преобразователь мощности может работать в двух режимах – местном режиме при задаче выходного тока вручную с помощью размещенных на корпусе системы управления преобразователем органов управления (этот режим работы предназначен исключительно для наладки и тестирования) и удаленном режиме при подаче сигналов от внешней компьютерной системы управления.

Блокировки силового преобразователя делятся на два типа:

- При срабатывании блокировки будет отключен силовой трансформатор. К таким блокировкам относятся блокировка по превышению тока первичной обмотки силового трансформатора и блокировка по открытию дверей шкафов преобразователя.
- Блокировка формирует запрет на выдачу тока в нагрузку – отключаются импульсы, подаваемые на драйверы IGBT, трансформатор при этом остается включенным. Все оставшиеся блокировки относятся к этому типу.

Главный модуль системы управления представляет собой шасси 19” 3Ux84HP, установленное в выходном шкафу. В шасси размещены: буквенно-цифровой индикатор, органы локального управления (переключатель местное/удаленное, кнопка включения «силы», кнопка сброса блокировок, энкодер задающий величину выходного тока, индикаторы положения переключателей и переключатель режима отображения индикатора), плата шунтов измерителя тока и петли регулирования, плата индикации для отображения состояния блокировок преобразователя, плата генератора шим-сигналов и источник питания 24 В.

Силовой трансформатор преобразователя должен быть размещен в отдельном помещении. Это необходимо в связи с высоким уровнем шума производимым трансформатором. А также в связи с большой выделяемой мощностью.

Оставшаяся часть преобразователя размещена в трех шкафах размерами 800×1000×2200 мм<sup>3</sup>. Первый шкаф содержит цепи включения силового трансформатора, во втором размещены цепь ввода мощности и преобразовательные модули и в третьем шкафу размещаются выходные цепи и электроника управления. Для вывода нагретого воздуха в крышках шкафов необходима установка вентиляторов.

Подключение силовых и сигнальных кабелей производится через крышу шкафа, а подвод охлаждающей воды через дно. Водяные трубы желательно провести под фальшь-полом.

Подключение к нагрузке необходимо сделать шинопроводом, плотность тока в шинах не более 1 А/мм<sup>2</sup>.

### 3.5.5.2 Источники питания квадрупольных линз и секступолей

Для питания квадрупольных линз и секступолей будут использоваться источники линейного ускорителя.

### 3.5.5.3 Источники питания отдельно стоящих корректоров

Отдельно стоящие корректирующие магниты питаются от одноканальных четырёхквadrантных источников питания типа MPS-25-50, выполненных в конструктиве «Евромеханика» (Рисунок 3.5.5.4) в модульном исполнении ( $432 \times 355 \times 133$  мм<sup>3</sup>).



Рисунок 3.5.5.4. Внешний вид источника питания MPS-25-50.

Основные параметры MPS-25-50 приведены в Таблице 3.5.5.8.

Таблица 3.5.5.8. Параметры MPS-25-50.

Параметры		Значение
$I_{out}$	Выходной ток	$\pm 25$ А
$U_{out}$	Максимальное выходное напряжение	$\pm 50$ В
$f$	Частота преобразования	100 кГц
$X_G$	Абсолютная погрешность регулирования тока	0.05% от $I_{MAX}$
$\sigma$	Дисперсия выходного тока за 24 часов работы	50 ppm от $I_{MAX}$
$\xi$	Пульсации выходного тока	$\leq 0.01\%$
$T_{CI_{out}}$	Температурный дрейф выходного тока	4 ppm/К
$P_D$	Тепловые потери в модуле	$\leq 150$ Вт

Питание модуля осуществляется в основном от сети 220/380 VAC, 50-60 Гц.

Структура MPS-25-50 аналогична структуре источника питания корректоров линака MPS-20-50. В состав модуля входят: импульсный преобразователь из постоянного напряжения в постоянное (DC-DC MeanWell RSP-2000-48), источники буферного и вспомогательного питания, микроконтроллер (MCU), а также схема эвакуации энергии, запасённой в индуктивностях обмоток электромагнитов во время работы.

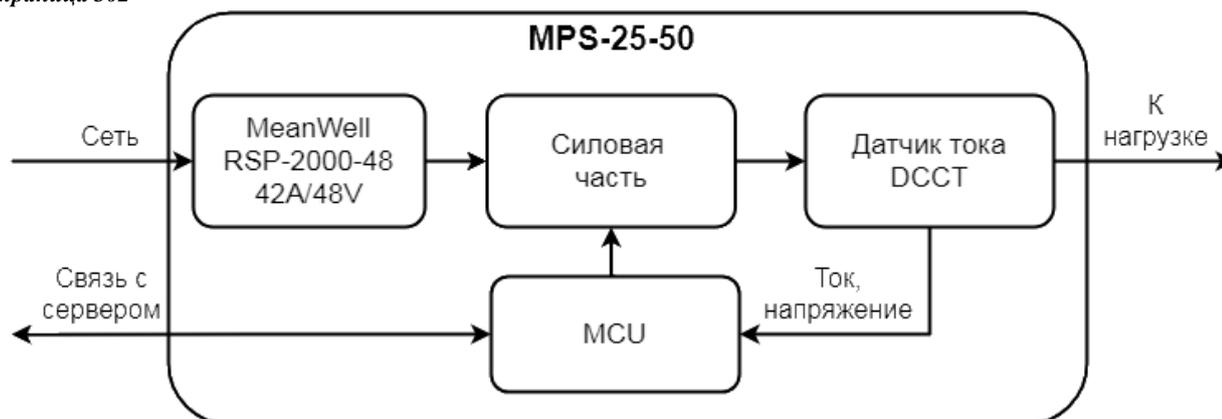


Рисунок 3.5.5.5. Структурная схема усилителя мощности MPS-25-50.

На **Рисунке 3.5.5.5** показана структурная схема импульсного преобразователя MPS-25-50 с цифровой обратной связью по току. Регулирование выходного тока производится широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения мостового инвертора, выполненного на современных полевых транзисторах. На выходе мостового инвертора имеется пассивный фильтр второго порядка. Петля обратной связи включает датчик тока ДССТ (АТ60-SG), обеспечивающий необходимую точность регулирования в статическом режиме, а также микроконтроллер, который производит генерацию широтно-импульсной модуляции мостового инвертора. Для подавления пульсаций питающей сети с частотами 50÷300 Гц вводится более быстрая петля обратной связи по напряжению.

Источник тока снабжён двумя бесконтактными датчиками тока компенсационного типа, установленными в выходной цепи (после фильтра). Один из датчиков используется в цепи обратной связи (АТ60-SG), второй в качестве независимого измерителя для системы контроля. Основные параметры АТ60-SG приведены в **Таблице 3.5.5.9**.

**Таблица 3.5.5.9.** Параметры АТ60-SG.

Абсолютная погрешность, 25±10°C	10 ppm
Нелинейность	2 ppm
Температурная нестабильность	0.1 ppm/К
Временной дрейф	0.2 ppm/месяц
Смещение нуля 25°C	1 ppm
Пульсации в диапазоне DC-10 Гц	0.5 ppm
Полоса пропускания (-3dB)	0 – 500 кГц

Система контроля и управления источником тока включает контроллер, который выполняет следующие функции: связь с сервером, измерение и обработка данных от датчика тока, генерация широтно-импульсной модуляции для мостового инвертора, измерение температуры основных узлов. Связь с сервером осуществляется по интерфейсу SPI, по заданному протоколу на частоте 20 МГц.

Ошибка в работе модуля может возникать при замыкании обмотки электромагнита на корпус или при перегреве силовой части модуля MPS-25-50. В случае замыкания обмотки схема защиты блокирует работу мостового преобразователя, выдерживается временная пауза,

далее автоматически производится повторный запуск источника тока. При перегреве силовой части источника питания также блокируется работа мостового преобразователя. Повторный запуск производится автоматически, по мере охлаждения силовой части.

На передней панели блока имеются два светодиодных индикатора. Индикатор “POWER ON” информирует о наличии питания мостового инвертора, индикатор “ERROR” о срабатывании защиты блока. Кроме светодиодных индикаторов на передней панели имеется цифровой светодиодный индикатор выходного тока и напряжения источника MPS-25-50.

### **3.6 Система управления**

Источник синхротронного излучения СКИФ включает в себя ускорительный комплекс, обеспечивающий получение и циркуляцию мощного и стабильного электронного пучка, устройства для генерации синхротронного излучения и пользовательские станции, использующие это излучение для проведения экспериментов. Эти три части комплекса (ускоритель, устройства генерации и пользовательские станции) управляются в строгом взаимодействии друг с другом: управление ускорителем должно учитывать работу устройств генерации излучения, пользовательские станции должны получать информацию о состоянии пучка, устройства генерации должны работать согласованно с работой пользовательских станций и ускорительного комплекса.

Поэтому одной из важнейших задач системы управления комплексом источника СИ в целом является обеспечение единого информационного пространства, предоставляющего полную информацию о состоянии основных параметров всех систем, входящих в структуру комплекса. В этой связи система управления должна строиться таким образом, чтобы интегрировать в себя управление всеми подсистемами и устройствами, обеспечивать оперативный обмен данными между подсистемами, а также поддерживать доступ к централизованному хранилищу данных.

Специфика управления различными параметрами и системами ускорительного комплекса источника СИ требует быстрого обмена данными между управляемыми и управляющими устройствами или компьютерами, что не так актуально для управления встроенными устройствами генерации излучения, а также большинством пользовательских станций. Но при этом для взаимодействия всех перечисленных структур необходимы быстрые связи, которые могут быть реализованы только на аппаратном уровне. Задача интеграции таких аппаратных связей в отдельные подсистемы и передачи данных о их состоянии в единое информационное пространство – другая важная проблема, которую должна решать система управления источником СИ.

Современные циклические и линейные ускорители оперируют с очень большими плотностями заряженных частиц в пучках, движущихся в сильных полях в очень ограниченном пространственном коридоре. Малейшие отклонения величин полей от их настроенных значений приводят к потерям частиц по той или иной причине. Задача проведения экспериментов с такими пучками требует позиционирования траекторий движения или равновесных орбит пучков частиц с точностями в доли микрометра.

Эти условия накладывают на управление ускорителями следующие требования: относительная точность стабилизации и управления многими элементами магнитных структур должна быть порядка  $10^{-5}$  и выше, в циклических ускорителях требуется непрерывные измерения всех основных параметров источников питания с целью их мониторинга. Необходимым является наличие систем быстрого подавления отклонений орбиты пучка, возникающих по причине наличия механических колебаний, а также нестабильности питания различных систем в частотном диапазоне до нескольких сотен герц.

Для управления системами, входящими в структуру комплекса источника СИ, используются различные программно-аппаратные платформы. Управление ускорительным комплексом источника СИ базируется на использовании платформы EPICS, которая является вполне адекватной средой для построения системы, реализующей быстрый обмен большим количеством данных, что требуется для обеспечения непрерывного мониторинга многочисленных параметров ускорителей. Для управления встроенными системами генерации, а также пользовательскими станциями возможно, например, использование платформы TANGO, применяющейся на ряде европейских источников СИ. Инженерные структуры, обеспечивающие стабильную и бесперебойную работу комплекса, будут управляться с помощью систем промышленной автоматики (SCADA). Таким образом, система управления должна включать в себя интерфейсы для взаимодействия программ, работающих на различных программных платформах.

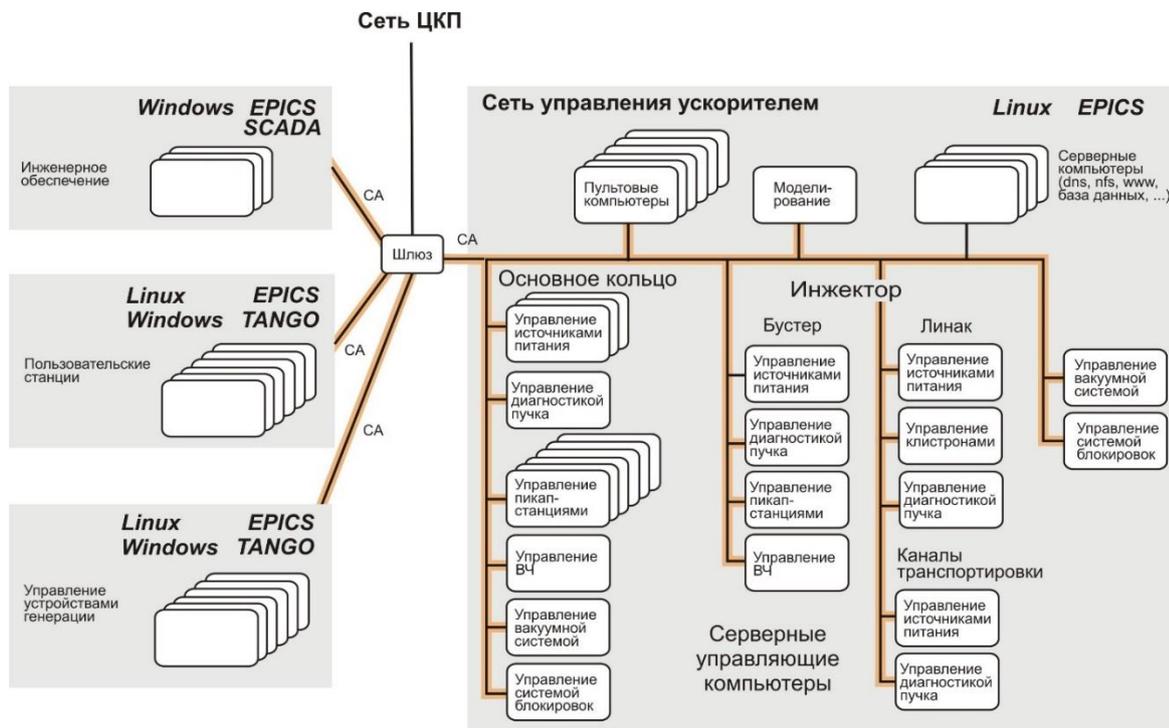


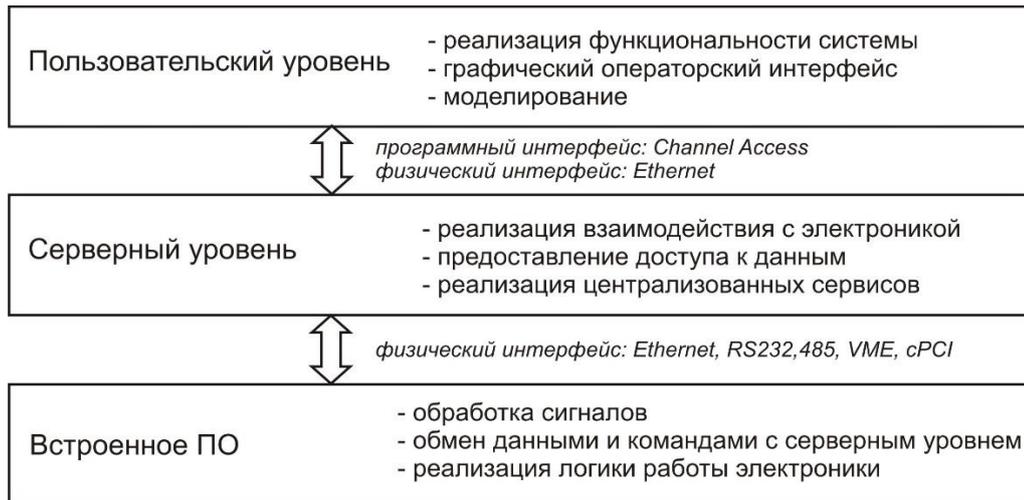
Рисунок 3.6.1. Блок-диаграмма компьютерной сети различных систем источника СИ СКИФ.

Диаграмма компьютерной сети источника СИ представлена на **Рисунке 3.6.1**. Показанные компьютеры могут представлять собой виртуальные машины, работающие в мощных серверах. На рисунке отмечены возможные платформы, которые могут быть использованы при построении управления различными частями Центра Коллективного

Пользования (ЦКП). Единое пространство данных обеспечивается с помощью протокола Channel Access (CA), являющегося компонентом платформы EPICS. Соответственно, приложения, использующие другие программные платформы, должны использовать специальные интерфейсные модули или серверы для обмена данными с EPICS.

### 3.6.1 Структура и состав системы управления

Система управления (СУ) ускорительным комплексом СКИФ базируется на EPICS. Структура СУ строится по 3-х уровневой схеме, приведенной на **Рисунке 3.6.1.1**.



**Рисунок 3.6.1.1.** Трехуровневая схема построения системы управления.

Верхний пользовательский уровень включает операторские компьютеры, в которых работают программы, предоставляющие графический интерфейс, а также программы, с помощью которых реализуются функции управления, выполняемые системой: накопление пучка, изменение режимов работы и т.п.

На среднем (серверном) уровне работают серверные компьютеры, которые с помощью серверных программ обеспечивают взаимодействие с контроллерами оборудования и электроникой. На серверном уровне также работают различные общие для системы сервисы, например, базы данных для сохранения значений параметров установки и пучка, а также для конфигурирования системы, общие файлово-загрузочные системы, системы поиска имен и т.д. Физическая связь между компьютерами верхнего и серверного уровня реализована внутри сегмента 10/1 Гб Ethernet, включающего управляемые свитчи, и изолированного от внешней сети с помощью шлюза.

Нижний уровень СУ составляют контроллеры оборудования (электроника), в которых выполняется первичная обработка и оцифровка сигналов, обеспечивается логика работы аппаратуры. Интерфейс между серверными компьютерами и электроникой реализуется с помощью различных распределенных (Ethernet, RS232, RS485) или каркасных шин (например, VME). В случае подключения электроники к серверным компьютерам через Ethernet используются локальные сегменты, что дает возможность организовать детерминированный по времени обмен данными между серверными программами (в EPICS это IOC – Input/Output

Controller) и электроникой. При использовании управляемых свитчей и VLAN все коммуникации системы управления можно организовать в едином сетевом пространстве.

Блок-схема оборудования СУ, включающая основные компьютеры и компоненты электроники, показана на **Рисунке 3.6.1.2**. Управление всеми частями ускорительного комплекса строится по аналогичной схеме. Операторские пульты компьютеры представляют собой мощные PC, каждый из которых оснащен несколькими дисплеями для вывода графической информации. Общая файловая и загрузочная системы для всех компьютеров системы управления размещается на специальных серверных станциях, обеспечивающих все необходимые сервисы.

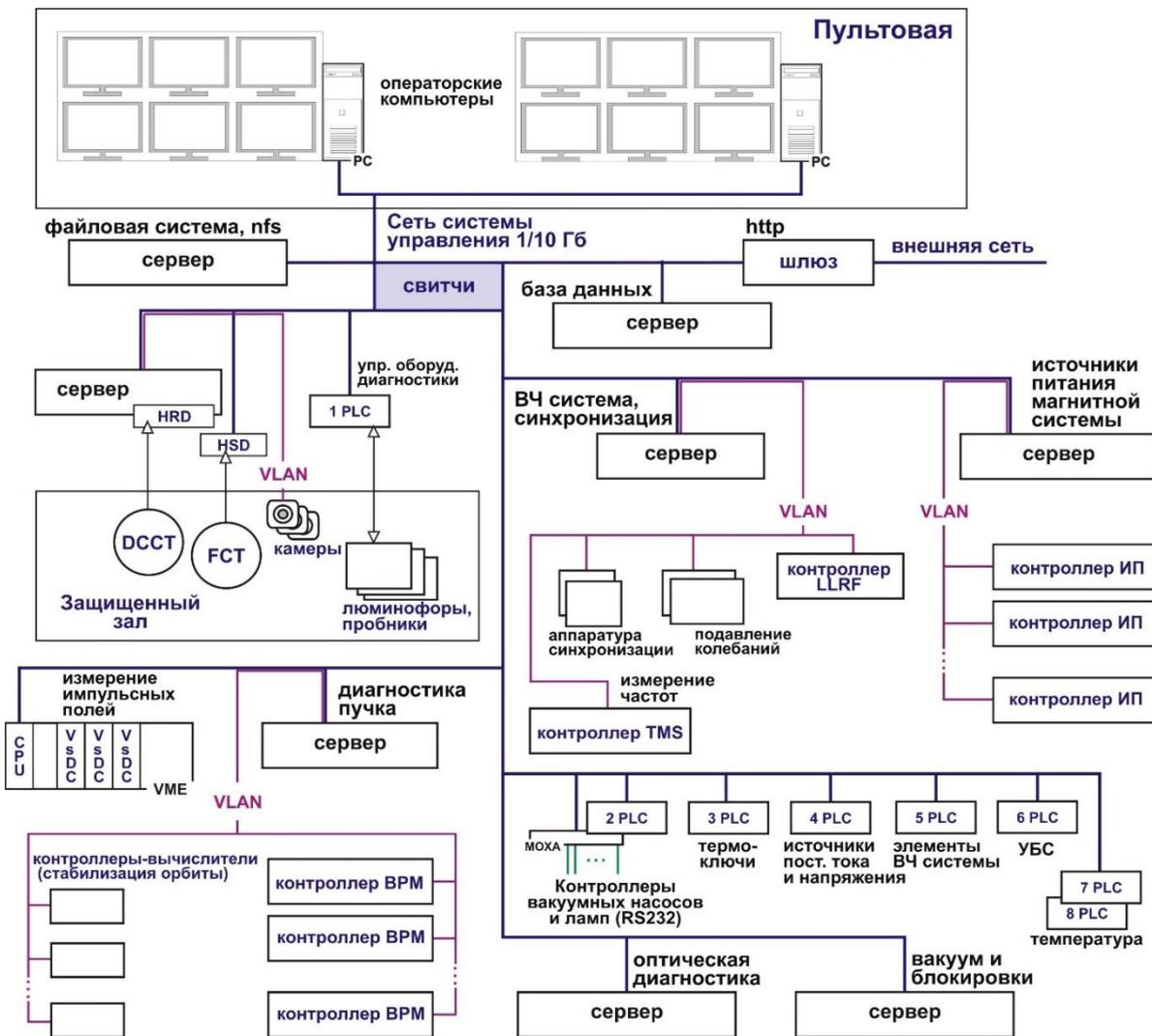


Рисунок 3.6.1.2. Блок-схема компьютеров и аппаратуры СУ СКИФ.

Компьютеры среднего, серверного уровня (стоечные серверные системы), куда также относятся и контроллеры каркасных шин (например, VME) распределены по функциональному назначению: управление источниками питания магнитной системы, управление системой ВЧ, управление устройствами диагностики пучка, управление вакуумной системой и т.п.

Электронику нижнего уровня составляют специализированные контроллеры для управления источниками питания (ИП) магнитной системы, ВЧ системы, контроллеры

пикапов и другая специальная электроника, обеспечивающая управление устройствами и системами ускорителей, выполняющая различные измерительные и диагностические функции, а также реализующая различные обратные связи.

Для управления вакуумным оборудованием используются промышленные контроллеры (контроллеры насосов и измерительных вакуумных ламп), которое подключается к компьютерам системы управления либо напрямую через Ethernet, либо по последовательной связи через терминальные серверы (например, MOXA). Кроме того, для контроля вакуумных шиберов используется программируемые логические контроллеры PLC (узлы PLC), с набором аналоговых и цифровых модулей.

Узлы PLC используются для управления вспомогательной аппаратурой диагностики пучка, для построения системы блокировок (обработка сигналов от различных датчиков и управление аварийным отключением источников питания), для управления вспомогательными источниками питания различных систем (накалы, подсветки, актуаторы и т.п.), а также для управления различными устройствами ВЧ системы. Кроме того, узлы PLC используются для построения общей системы измерения температур различных элементов комплекса.

Для измерения сигналов с датчиков тока пучка DCCT и FCT предполагается использовать два типа АЦП: АЦП высокого разрешения с полосой от 0 до 100 кГц для оцифровки сигнала с DCCT, и АЦП высокого разрешения по времени с полосой 1-2 ГГц для оцифровки сигнала с FCT.

Для измерения импульсных полей магнитов-септумов предполагается использовать модули VsDC, выполненные в формате VME, а для контроля стабильности работы магнитов-кикеров - АЦП с полосой порядка 100-200 МГц.

### **3.6.2 Структура сети СУ**

Схема сети СУ сегментирована и построена на управляемых свитчах. Блок-схема, иллюстрирующая принцип построения сети системы управления, показана на **Рисунке 3.6.2.1**. Можно выделить основной (серверный) уровень сети, базирующийся на свитчах с портами XGT (10 Гб), включенными в стек, а также полевой уровень, состоящий из сегментов, узловыми элементами которых служат свитчи с коммутируемыми портами 1 Гб и аплинком 10 Гб, через который каждый свитч подключается к какому-либо свитчу серверного уровня.

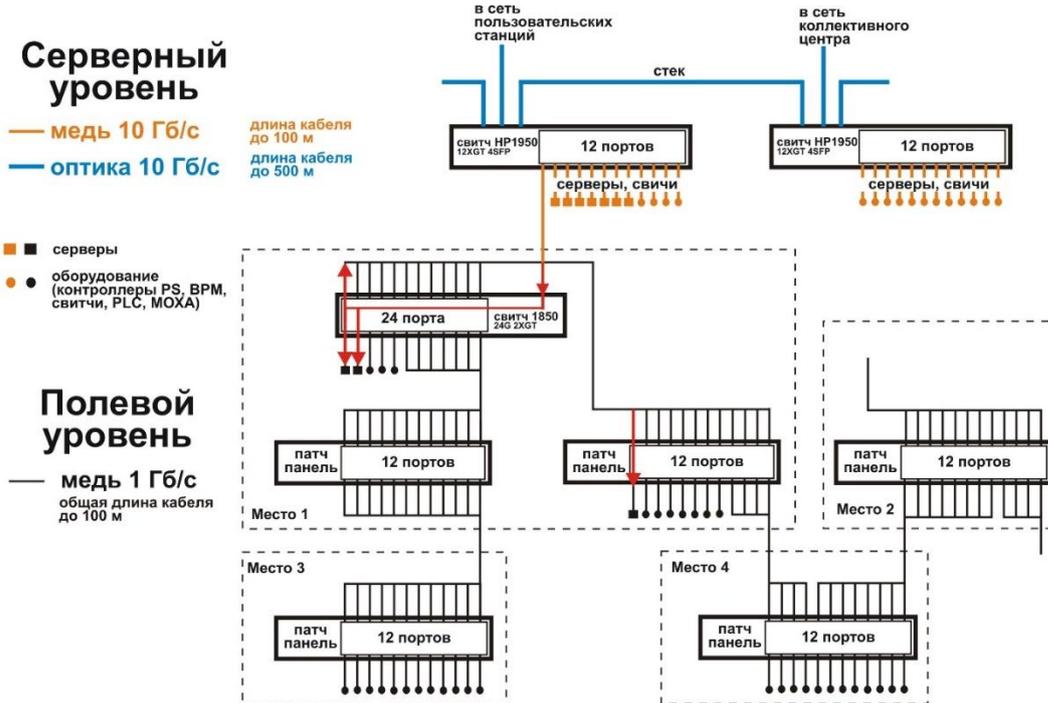


Рисунок 3.6.2.1. Блок-диаграмма, отражающая принцип построения сети системы управления.

Серверные свитчи имеют по несколько портов SFP (оптика) для соединения с другими сетями: сетью юзеров, общей сетью ЦКП, сетью вычислительного центра и т.д. Длина оптического кабеля может достигать 500 м. Для портов 10 Гб используется витые пары, при этом длина кабеля до каждого свитча полевого уровня не должна превышать 100 метров. К серверным свитчам помимо свитчей полевого уровня подключены серверные компьютеры, в которых функционируют серверные программы, обеспечивающие взаимодействие с аппаратурой и обработку данных, а также работают различные непрерывные сервисы (архивирование данных, поддержка вэб, конвертация данных в формат других систем управления и т.п.) Кроме того, на серверном уровне подключены пультовые компьютеры, в которых работают операторские приложения.

К полевым свитчам подключается различное оборудование с таким расчетом, чтобы объем сетевого трафика через аплинк каждого свитча не превышал нескольких процентов от его пропускной способности. При необходимости на полевом уровне не исключается подключение серверного компьютера.

Для администрирования на всех управляемых свитчах и компьютерах зарезервированы отдельные порты. На **Рисунке 3.6.2.1** точками условно отмечены подключенные периферийные устройства, а квадратиками – серверные и операторские компьютеры.

На серверном уровне работают протоколы EPICS. Для упорядочивания сетевого трафика в сети повсеместно используются VLANы. Для обеспечения возможности гибкого оперативного переключения устройств используются стационарные коммутационные панели (патч-панели).

### 3.6.3 Синхронизация СУ

Импульсные устройства и системы комплекса, требующие взаимной синхронизации работы:

- система форинжекции (электронная пушка), обеспечивающая инжекцию пучка в линак,
- система питания линака (клизтроны),
- импульсные магниты-септумы и магниты-кикеры, обеспечивающие инжекцию и выпуск пучка в бустерном синхротроне и инжекцию в основное кольцо,
- элементы магнитной системы бустера, обеспечивающие ускорение частиц,
- системы диагностики пучка.

Работа этих систем должна быть синхронизирована с движением пучка в ускорителях комплекса, т.е. с частотой, от которой возбуждаются ВЧ-системы. Схема системы раздачи опорной частоты ВЧ по ВЧ-системам комплекса СКИФ приведена на **Рисунке 3.6.3.1**.

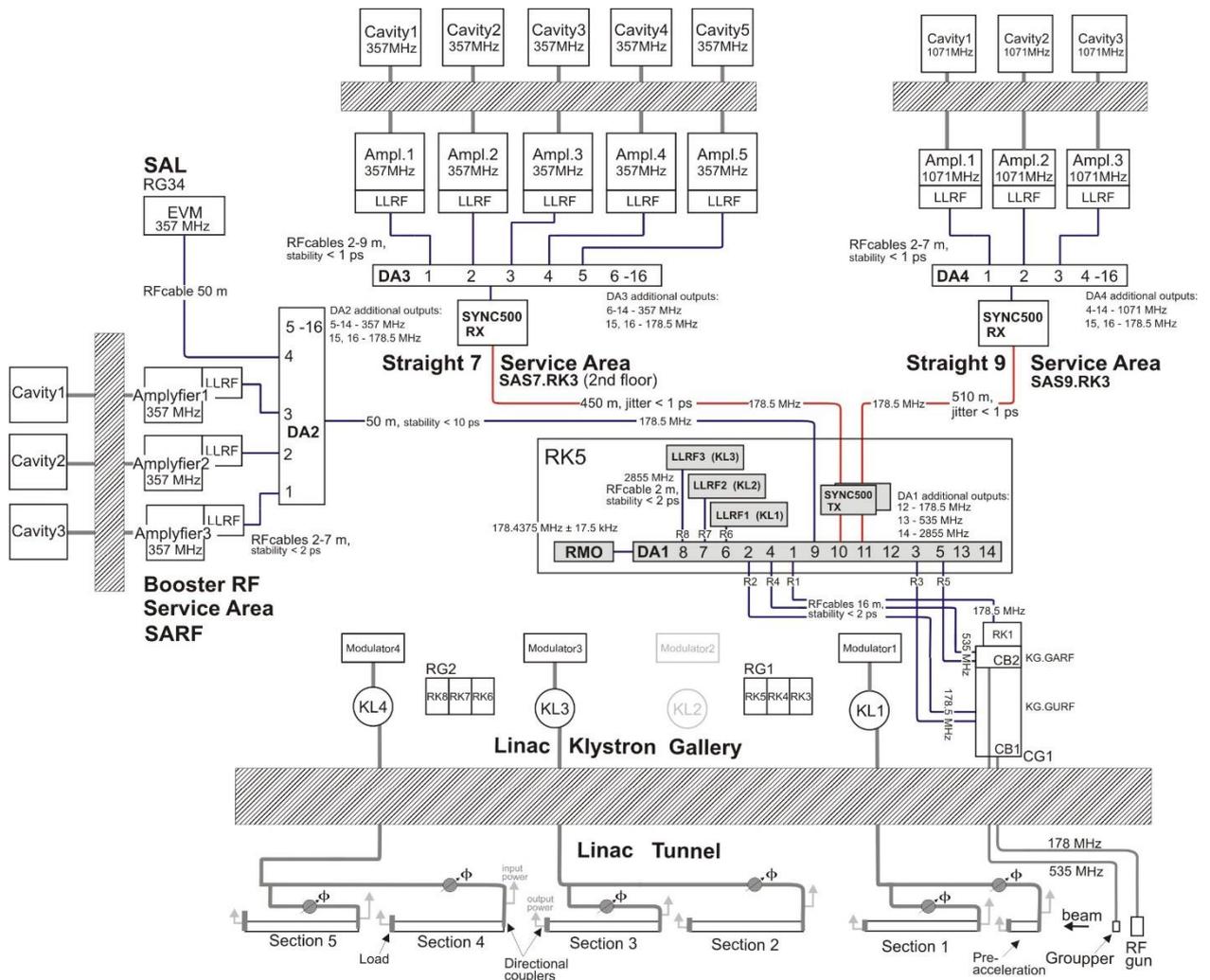


Рисунок 3.6.3.1. Блок-схема системы распределения опорной частоты ВЧ.

Задающий генератор ВЧ (RMO – Reference Master Oscillator) работает на частоте 178.5 МГц. Эта частота подается на ВЧ-генератор электронной пушки линака. Частота ВЧ для основного кольца и бустера выбрана 357 МГц, т.е. в соответствии с периметрами бустера (158.74 м) и накопителя (476.22 м) число ВЧ-сепаратрис в бустере равно 189, а в накопителе - 567. На ВЧ-систему линака (клизтроны) подается частота, умноженная на 16: 2856 МГц.

Система раздачи опорной частоты ВЧ задает опорные частоты для всех систем ВЧ и для системы синхронизации. В RMO предусмотрена возможность плавного изменения выходной частоты в пределах  $\pm 30$  кГц для измерения хроматизма бустера и накопителя.

Схема инъекции пучка в линейный ускоритель требует стабильности взаимной привязки фаз ВЧ частот, приходящих на оборудование с точностью лучше 5 пкс. Поэтому, чтобы уменьшить влияние различных внешних факторов на нестабильность фаз, необходимо разместить RMO в непосредственной близости от инжекционной части линака. Относительная нестабильность фаз задающих частот, подаваемых на ВЧ-системы колец и на систему синхронизации не должна превышать 50 пкс.

Система синхронизации комплекса базируется на использовании аппаратуры фирмы MRF (финская компания Micro-Research Finland), в которой реализован следующий подход: взаимная синхронизация основана на распространении по устройствам сигналов и меток событий в привязке к задающей частоте ВЧ. Блок-схема системы синхронизации комплекса СКИФ приведена на **Рисунке 3.6.3.2**.

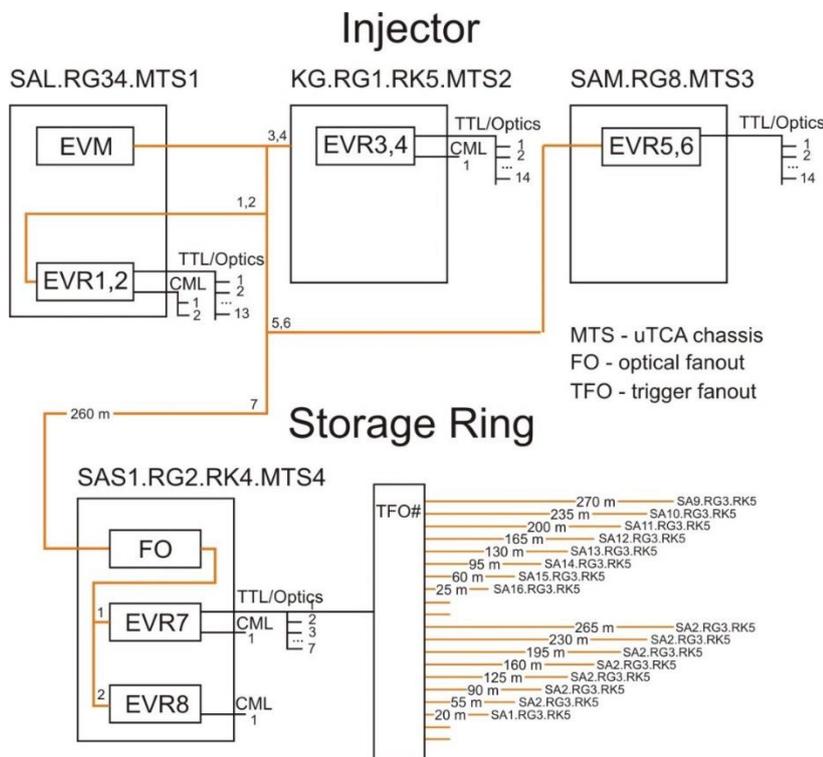


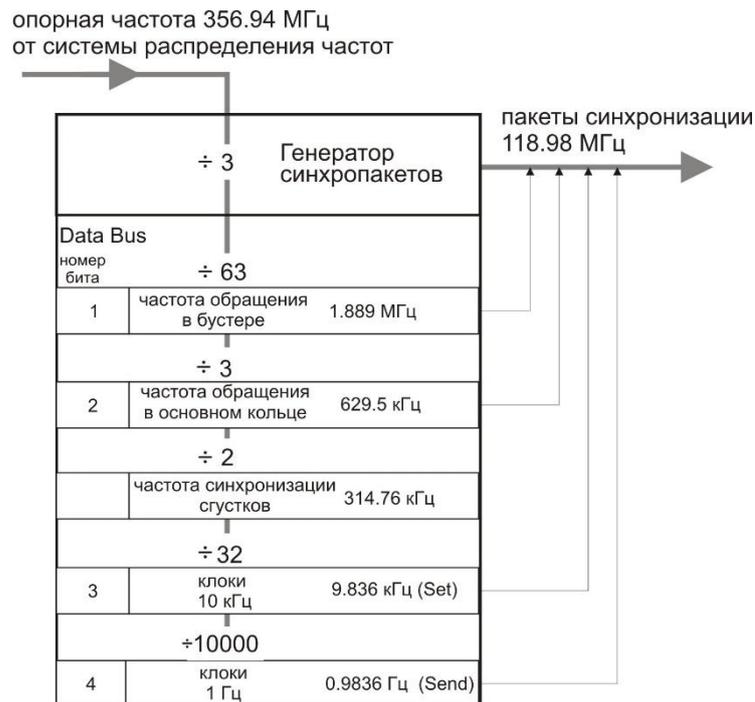
Рисунок 3.6.3.2. Блок-схема системы синхронизации.

Система синхронизации включает генератор событий (блок EVM – Event Master), который синхронизируется частотой ВЧ 357 МГц и по оптической связи с частотой порядка 119 МГц выдает двухбайтные синхропакеты, и блоки приема синхропакетов (блок EVR – Event Receiver), которые в соответствии с данными, содержащимися в каждом синхропакете, могут генерировать задержанные импульсы различного формата и длительности (оптика, TTL, CML). Задержка генерации импульса в EVR может регулироваться как с дискретностью 8.4 нс (10 каналов в формате TTL или оптики), так и с дискретностью 0.21 нс (2 канала CML, 2 канала TTL или оптика).

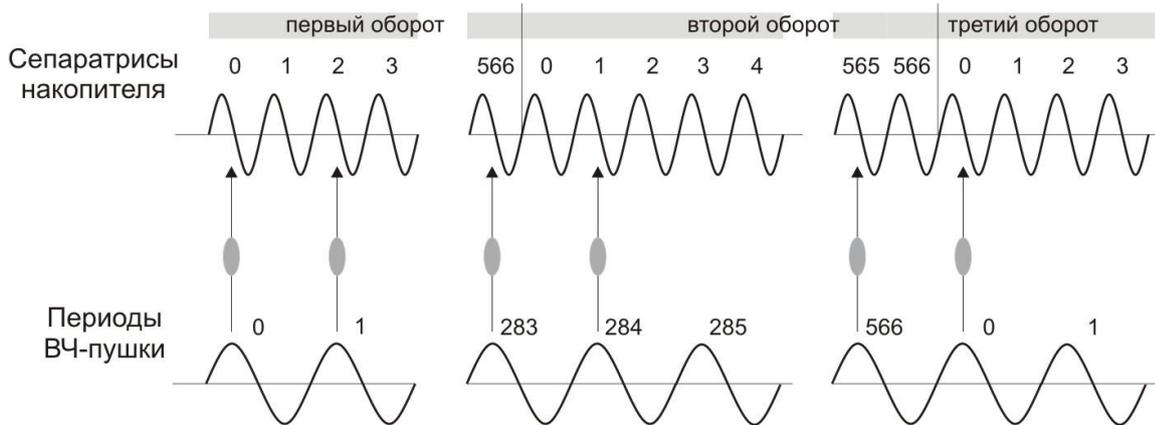
Для размножения и передачи импульсов синхронизации используются пассивные размножители.

Отправка двухбайтных пакетов из EVM выполняется в соответствии со сценарием, записанным в секвенсер блока. Пакеты синхронизированы с движением пучка в бустере и основном кольце. Первый байт синхропакета содержит код события, второй байт предназначен для передачи данных. Второй байт используется для побитовой кодировки передачи тактовых частот. Диаграмма генерации тактовых частот представлена на **Рисунке 3.6.3.3**.

Частота высылки синхропакетов определяет возможности системы синхронизации задавать темп следования событий, распространяемых по устройствам.



**Рисунок 3.6.3.3.** Схема генерации тактовых частот в блоке RMO.



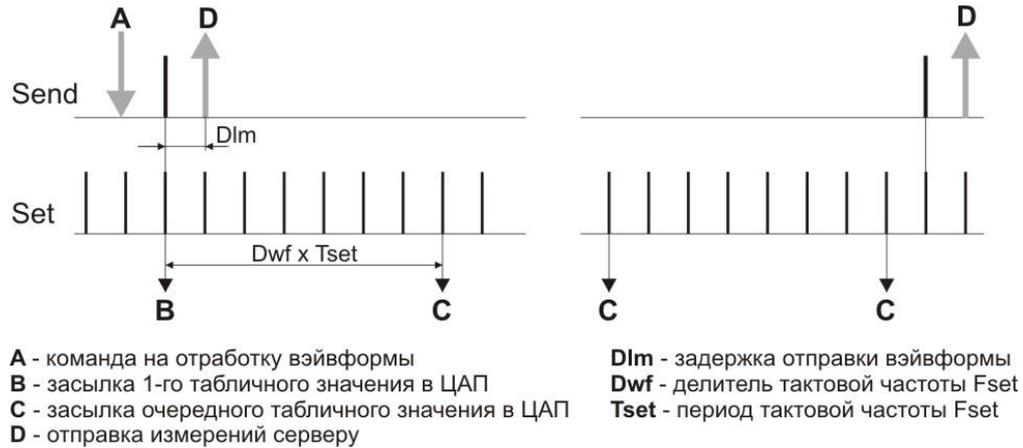
**Рисунок 3.6.3.4.** Цикл двух оборотов пучка в накопителе: соответствие фаз ускоряющего напряжения пушки и сепаратрис.

Задающая частота для ВЧ-пушки линака выбрана в два раза меньшей (178.5 МГц), чем задающая частота для ВЧ колец бустера и накопителя. Таким образом, линак может заполнять бустер (и накопитель) только через одну сепаратрису. Совпадение нулевой сепаратрисы накопителя с ускоряющей фазой ВЧ-пушки повторяется каждый второй оборот пучка в накопителе (см. **Рисунок 3.6.3.4**).

Для того, чтобы правильно выставлять задержку срабатывания пушки и импульсных устройств перепуска относительно фазы частоты обращения в накопителе, нужно всегда стартовать сценарий генерации событий от одного и того же взаимного положения фаз частоты обращения в кольце накопителя и частоты работы ВЧ-пушки, что достигается целой кратностью частоты высылки синхропакетов частоте обращения в накопителе.

С помощью синхропакетов в виде последовательности событий передается сценарий работы элементов инжектора (линак и бустер), а также в байте данных рассылаются клоки, соответствующие частотам обращения пучка в ускорительных кольцах (импульсы нулевой сепаратрисы). Нестабильность частоты следования пакетов синхронизации, а также выходных электрических сигналов блоков EVR не превышает 25 пкс.

Синхронизация работы всех устройств (контроллеров систем питания, диагностики пучка, инженерных систем и т.д.) базируется на использовании тактовых импульсов (клоков), задающих темп и цикличность различных процессов, связанных с работой ускорительного комплекса и электроники управления. Используется две частоты тактирования: 10 кГц для отработки уставок и выполнения измерений контрольно-измерительной и диагностической электроникой (клоки Set) и 1 Гц для организации чтения измерений из устройств, а также синхронизации обновления значений переменных (клоки Send). Диаграмма следования тактовых сигналов приведена на **Рисунке 3.6.3.5**. Частоты следования всех тактовых импульсов получаются целым делением частоты задающего генератора ВЧ 356.94 МГц (см. **Рисунок 3.6.3.3**).



**Рисунок 3.6.3.5.** Диаграмма следования тактовых импульсов.

Клоки Set тактируют контрольно-измерительную электронику (устройства) при выполнении отработки перестройки величины управляемого параметра (например, выходного напряжения ЦАП). Тем самым обеспечивается синхронность управления во всех устройствах. Если контроллер источника питания или контроллер ВЧ получил команду «старт» на отработку изменения уставки, то выполнение команды начнется после прихода очередного клона Send и по наличию клона Set. Кроме того, клоки Set синхронизируют измерения АЦП, размещенных в периферийных устройствах (контроллерах источников питания и ВЧ, контроллерах аппаратуры диагностики пучка), что обеспечивает синхронность всех измерений в системе управления. В устройствах предусмотрено прореживание клоков Set, что позволяет с помощью одной вэйвформы с уставками выполнять отработку продолжительных процессов с медленным изменением параметров.

Клоки Send также формируют измерительные интервалы (циклы). При приходе очередного клона Send периферийный контроллер высылает в компьютер массив измерений, выполненных в контроллере после прихода предыдущего клона Send, либо, если программное обеспечение, работающее внутри контроллера, поддерживает протокол Channel Access (CA), происходит синхронное обновление значений переменных, доступных по протоколу CA. В периферийных контроллерах предусмотрена управляемая задержка отправки пакета относительно прихода клона Send. Это позволяет упорядочить передачу данных по сети в случае использования большого числа контроллеров. В системе управления СКИФ клоки Send также используются для старта цикла работы инжектора.

**Таблица 3.6.3.1.** Регулярные сигналы системы синхронизации.

Сигнал		Частота	Делитель	Бит сигнала
1	ВЧ	356.94 МГц		-
2	Бустер	1.878 МГц	190	1
3	Осн. кольцо	626 кГц	570	2
4	10 кГц (Set)	9.908 кГц	35910	3
5	10 Гц	9.9084 Гц	35910000	4
6	1 Гц (Send)	0.99084 Гц	359100000	5

В **Таблице 3.6.3.1** показан пример побитовой кодировки тактирующих сигналов (клоков), обеспечивающих распространение следующих частот: частоты обращения бустера, частоты обращения основного кольца, тактовых частот 10 кГц, 10 Гц, 1 Гц. Каждая частота образуется целночисленным делением исходной задающей частоты ВЧ 356.94 МГц. Таким образом реализуется привязка всех тактовых частот к частоте ВЧ.

Периодичность сигнала задается установлением соответствующего бита. Приемное устройство (EVR), получив в очередном пакете установленное значение соответствующего бита, генерирует в свой соответствующий выход импульс.

Сценарий событий, исполняемый в блоке EVM, записывается в память секвенсера. Запись составляется из последовательно исполняемых строк, в каждой из которых указывается время задержки для генерации сигнала, выраженное в периодах частоты рассылки синхропакетов и отсчитываемое от начала исполнения сценария, а также номер события. Сценарий может выполняться циклически, либо старт его выполнения может быть привязан к какому-либо событию.

Задержка между появлением всех событий, определенных в сценарии выражается в удвоенных периодах частоты обращения в накопителе. Таким образом обеспечивается взаимная привязка фаз обращения пучка в бустере и основном кольце, а фазы работы ВЧ-пушки линака.

Для синхронизации инъекции пучка из линейного ускорителя в бустер используются два события сценария: “старт инъекции в бустер” и “старт впуска пучка в бустер”. Сигнал “старт инъекции в бустер” появляется за девять миллисекунд и предназначен для запуска “медленных” импульсных систем с целью их подготовки к моменту пролета пучка. Это запуск процесса зарядки формирующей линии, которая затем в момент пролета пучка будет разряжена на магнит-кикер, запуск модуляторов клистронов линака и пр. Непосредственно перед пролетом пучка появляется событие “старт впуска пучка”, по которому запускаются каналы EVR, генерирующие задержанные импульсы запуска для устройств формирования и впуска пучка: запуск пушки линака, старт магнитов-кикеров.

Аналогично, для синхронизации перепуска пучка из бустера в основное кольцо также используются два события: “старт подготовки перепуска” и “старт перепуска”.

Ниже описан пример синхронизации перепуска пучка, ускоренного в бустере, в основное кольцо. Диаграмма процесса перепуска приведена на **Рисунке 3.6.3.6**. Процесс инициируется появлением события “старт подготовки перепуска”. По этому событию запускаются медленные импульсные системы: корректоры, подводящие орбиту пучка к выпускному септуму, затем за несколько десятков микросекунд до выпуска пучка запускается магнит-септум. По событию “перепуск” с соответствующими задержками запускаются выпускные кикеры, выбивающие пучок из бустера, и кикеры основного кольца, обеспечивающие впуск пучка. Выбор сепаратрис для инъекции в основное кольцо осуществляется при помощи управления временем задержки срабатывания быстрых систем (пушки линака и кикеров) относительно события “перепуск”, а также регулировкой времени задержки срабатывания магнитов-септумов.

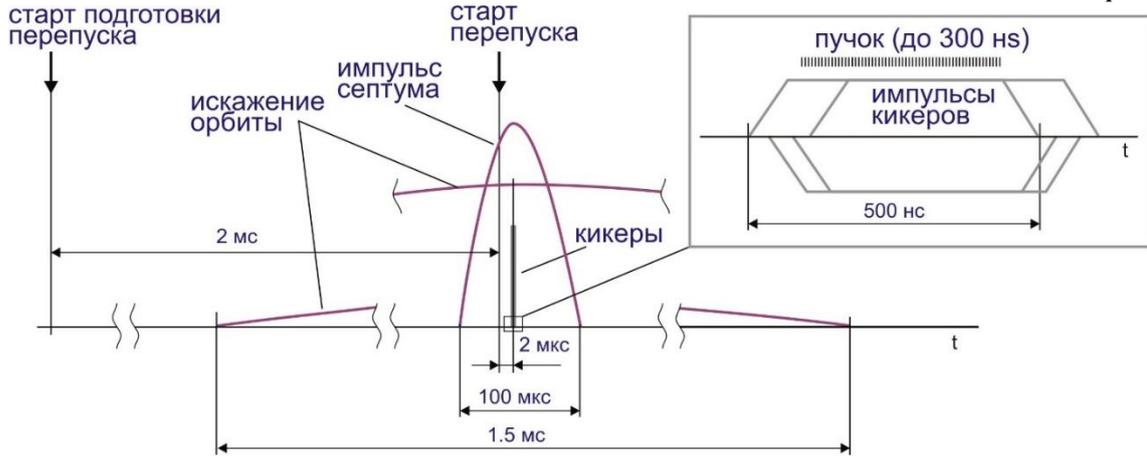


Рисунок 3.6.3.6. Диаграмма процедуры выпуска ускоренного пучка из бустера.

Система синхронизации обеспечивает распространение импульсов тактовых частот (клов) 10 кГц и 1 Гц), которые поступают на контроллеры источников питания магнитной системы, ВЧ, системы впуска/выпуска и на другие устройства, а также на устройства диагностики пучка: АЦП, измеряющие ток пучка, и на пикап-станции. Во-первых, клок 10 кГц предназначен для синхронизации отработки уставок, заданных в виде вэивформ, в контроллерах источников питания как инжектора, так и основного кольца. Во-вторых, клок 10 кГц используется для обеспечения синхронных измерений параметров устройств во всех контроллерах и отдельных АЦП, а также в устройствах диагностики пучка.

Клок 1 Гц тактирует работу инжектора, а также пересылку в управляющие серверные компьютеры измерений, выполненных в контроллерах. Если требуется, то для тактирования регулярных “медленных” измерений, например, измерений температуры различных критических точек ускорителя и его элементов, уровня вакуума, и т.п. предусмотрен клок 10 Гц, что соответствует номинальной частоте сканирования рекордов в EPICS.

Для измерений параметров пучка в процессе ускорения в бустере предусмотрено несколько специальных событий, которые могут быть распределены по ходу выполнения сценария ускорения: “старт диагностики инжекции в бустер”, “старт диагностики выпуска из бустера”, “старт камеры SLM”. Например, событие “старт камеры SLM” используется для периодического запуска CCD-камер в процессе ускорения пучка, что обеспечивает съемку с заданным интервалом нескольких изображений пятна от пучка СИ.

Для запуска удара по пучку в основном кольце с целью измерения бетатронных частот используются два специальных события “подготовка удара” и “удар”, которые, либо вписываются в сценарий отработки инжекции, либо выполняются в отдельном сценарии, который также, как и сценарий инжекции, запускается от тактовой частоты 1 Гц. Возможен удар по любому сгустку, вращающемуся в основном кольце. Выполнение сценария в EVM можно также инициировать по команде от компьютера.

Система синхронизации обеспечивает метки времени для синхронизации изменения значений различных переменных с каким-либо событием, например, впуском пучка, или определенным измерительным интервалом. С этой целью предусмотрена программно-

аппаратная система мечения, принцип работы которой основан на реализованной в EPICS возможности присвоения изменившейся переменной метки времени, взятой у другой переменной.

Модуль EVR, получив определенное событие, выставляет прерывание, по которому соответствующий IOC значение соответствующей переменной, условно назовем ее NEPV (New Event Process Variable), и присваивает ей текущую метку времени (Time Stamp). Все переменные, которые сконфигурированы так, что при их изменении берется метка времени от переменной NEPV, изменяясь в интервале между двумя последовательными событиями, будут получать одну и ту же метку времени.

Диаграмма установки меток времени приведена на **Рисунке 3.6.3.7**. Для синхронизации измерений, относящихся к текущему интервалу между событиями, используются переменные типа NEPV, а для синхронизации данных, которые относятся к предыдущему интервалу, но поступают в компьютер лишь после появления нового события, используется еще один тип переменных PEPV (Previous Event Process Variable), которым присваивается метка времени NEPV, взятая перед ее обновлением.

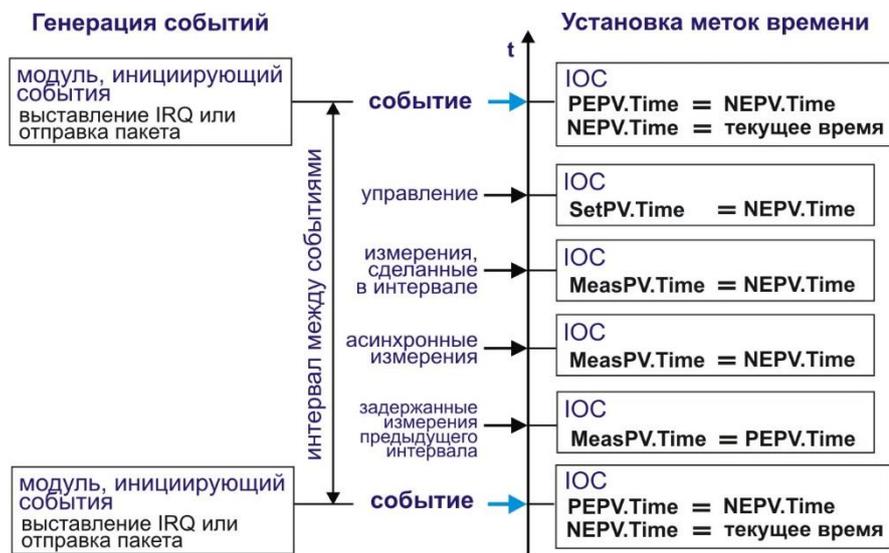
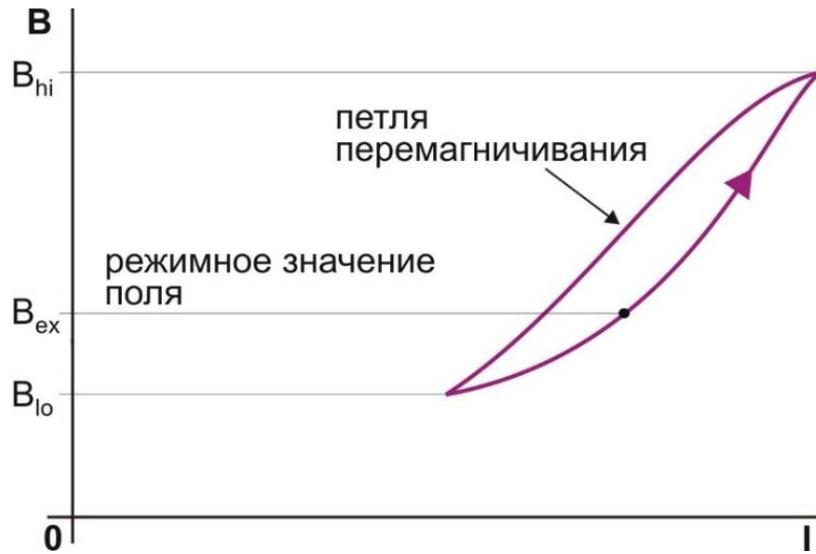


Рисунок 3.6.3.7. Диаграмма установки меток времени для различных переменных.

### 3.6.4 Сценарии управления

Для точного воспроизведения требуемого состояния магнитных полей после выполнения различных операций по изменению тока в магнитных элементах, например, для восстановления исходной ситуации после выполнения настроек, потребовавших заметное изменение токов возбуждения в магнитах, формирующих оптику колец, применяется **цикл перемагничивания магнитных элементов**.

Схематично диаграмма перемагничивания показана на **Рисунке 3.6.4.1**. Цикл перемагничивания выполняется таким образом, чтобы сначала значения магнитных полей во всех элементах достигли неких максимальных значений  $B_{hi}$ , установленных для данного режима работы, затем устанавливаются некие минимальные значения  $B_{lo}$ , после чего делается возврат к режимному значению поля.



**Рисунок 3.6.4.1.** Диаграмма цикла перемагничивания.

Для обеспечения надежной и повторяемой работы системы коррекции орбиты в бустерном синхротроне после выполнения каких-либо операций по заметному изменению тока в отдельных магнитах коррекции перед установлением токов в нужное состояние необходимо выполнить процедуру размагничивания корректоров. Для этого в контроллеры, управляющие корректорами, записываются массивы уставок (вэйвформы), задающие отработку от текущего состояния затухающей синусоиды с начальной амплитудой, равной максимальному току для каждого корректора, а затем выводящие токи в значения, соответствующие нужному состоянию. Пример отработки таких вэйвформ приведен на **Рисунке 3.6.4.2.**



**Рисунок 3.6.4.2.** Пример размагничивания отдельных магнитов-корректоров орбиты пучка.

**Сценарий получения, ускорения и транспортировки** пучка электронов реализуется в инжекторе, состоящий из линейного ускорителя, бустерного синхротрона и каналов транспортировки пучка. Блок-схема инжектора представлена на **Рисунке 3.6.4.3.**

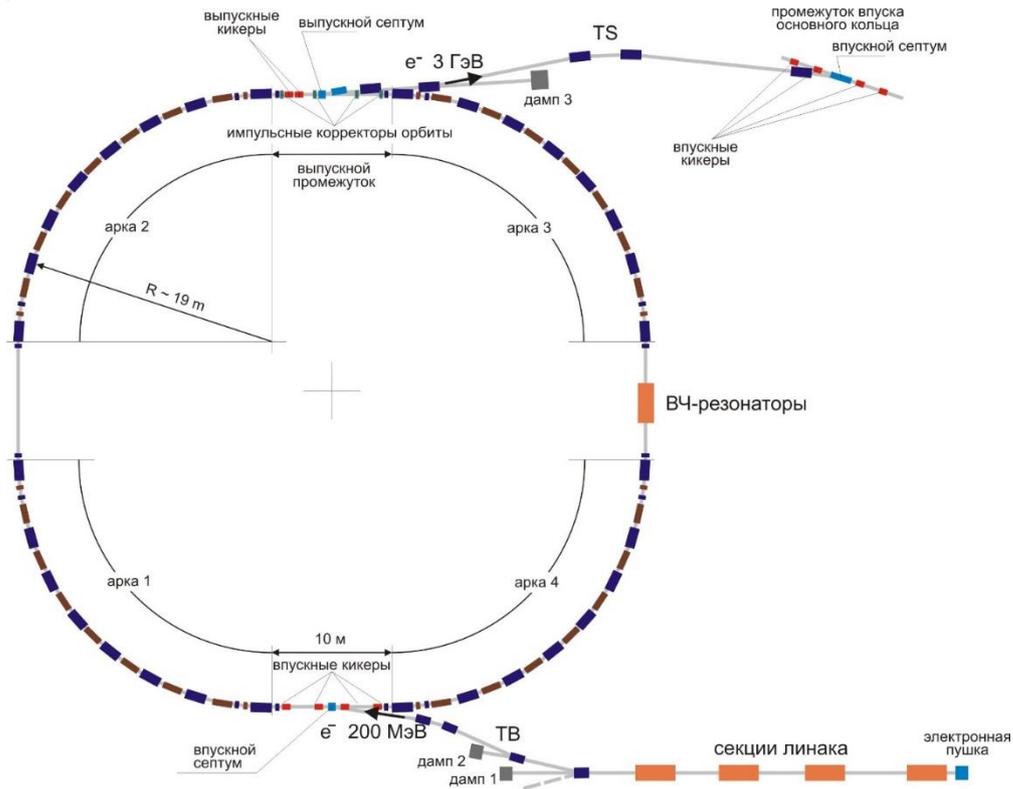


Рисунок 3.6.4.3. Схема инжекционной части ускорительного комплекса.

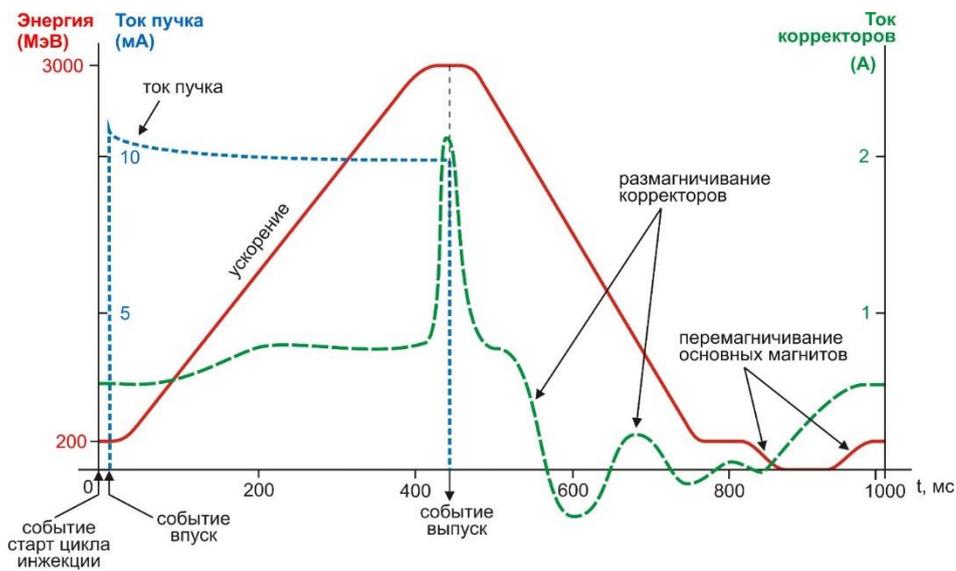


Рисунок 3.6.4.4. Цикл работы инжектора.

Пучок ускоряется в линаке до 200 МэВ и по каналу транспортировки ТВ перепускается в бустер. Пучок, захваченный в бустер, может заполнять много сепаратрис. В бустере пучок за 300 мс ускоряется до 3 ГэВ и по каналу TS перепускается в основное кольцо. Каналы транспортировки состоят из магнитных элементов, работающих в постоянном режиме и всегда настроенных на выбранную энергию частиц. Элементы впуска/выпуска частиц работают в импульсном режиме синхронно с пролетом пучка.

Цикл работы инжектора представлен на **Рисунке 3.6.4.4** где показаны графики изменения тока в основных элементах магнитной структуры бустера (диполях и квадрупольях), тока в отдельных корректорах орбиты, а также тока пучка в процессе ускорения в процессе выполнения цикла.

Перепуск пучка в основное кольцо каждый раз осуществляется в заданную фазу обращения. Соответственно, возможно ускорение и перепуск отдельных сгустков в определенные сепаратрисы основного кольца с целью обеспечения привязки синхронизации экспериментального оборудования или обеспечения проведения специальных экспериментов. Предусмотрен режим так называемой top-up инъекции, когда определенное число сгустков с нужным зарядом перепускается из бустера в заданную фазу обращения с целью поддержания равномерного заполнения сгустками определенной части периметра основного кольца.

Для **впуска и накопления частиц в основном кольце источника СИ** используется система, работающая в горизонтальной плоскости, и состоящая из магнита-септума, обеспечивающего влет пучка в кольцо, и четырех кикеров, создающих локальное однооборотное отклонение орбиты пучка в месте впуска с целью подвести орбиту циркулирующего пучка вплотную к магниту-септуму. Сценарий впуска выполняется следующим образом: от системы синхронизации приходит стартовый импульс, который задерживается на заданное время и за несколько десятков микросекунд до влета пучка запускает магнит-септум, а непосредственно перед влетом впускаемого пучка стартуют магниты-кикеры. Все магниты запускаются таким образом, чтобы момент пролета впускаемого пучка приходился на максимальное поле.

По причине того, что частота ВЧ-пушки линака в два раза меньше частоты ВЧ колец, **сценарии заполнения периметра кольца накопителя** сгустками требуют отдельного рассмотрения.

Полностью заполнить периметр накопителя сгустками нельзя из-за возникновения на орбите пучка ионного следа, образующегося из-за взаимодействия электронов с атомами остаточного газа. Для удаления ионов нужно оставлять свободный интервал продолжительностью примерно в 500 нс. За это время ионы успевают сдрейфовать от орбиты на достаточное расстояние, чтобы не оказывать воздействия на пучок.

Пушка линака стартует от события 19. На модулятор пушки подаются импульсы, образующие трейн сгустков с интервалом между сгустками 5.6 нс длительностью до 300 нс (например, 50 сгустков занимают интервал 280 нс). Заполнение кольца накопителя начинается от нулевой сепаратрисы накопителя с “нулевой” задержки срабатывания пушки относительно события 19. Слово “нулевая” взято в кавычки, т.к. эта задержка соответствует нулевой сепаратрисе накопителя, но сама задержка по сути нулевой не является из-за имеющих длин трасс и соответствующего им времени распространения сигналов в системе синхронизации, а также ненулевого времени пролета пучка по линаку и каналам транспортировки.

Далее с увеличением задержки на 280 нс за 8 циклов накопитель наполняется четными сгустками (по 50 сгустков до номера 400). Затем “нулевая” задержка увеличивается на полный период обращения в накопителе (1588.5 нс). В силу выбранных кратностей ВЧ полученной

задержке уже соответствует первая сепаратриса накопителя. Схема совпадения сепаратрис и фазы ускоряющего напряжения на ВЧ-пушке проиллюстрирована на **Рисунке 3.6.3.4**. После этого по такой же схеме накопитель дополняется нечетными сгустками. В случае, если заряда в сгустках пучка, ускоренного в бустере, не хватает для заполнения кольца за один “проход”, процедура заполнения повторяется до тех пор, пока заряд в сгустках накопленного пучка не достигнет нужной величины.

**Заполнение накопителя произвольным числом сгустков** с их произвольным распределением по периметру достигается варьированием задержки пушки относительно события 19, а также регулировкой длины трейна сгустков, выходящего из пушки.

**Режим работы накопителя со стабильным током циркулирующего пучка** в настоящее время является нормой для всех современных источников СИ. За рубежом такой режим работы называется режимом “top off” или “top-up”. В настоящее время требуется обеспечивать стабильность тока порядка одного процента. Для обеспечения такого режима работы требуется непрерывно контролировать ток пучка в накопителе, распределение заряда по сепаратрисам и периодически, в зависимости от времени жизни пучка и заданного уровня стабильности тока пучка, добавлять в разные места трейна, циркулирующего в накопителе, новые порции частиц.

### 3.6.5 Управляемые устройства

Перечень управляемых устройств ускорительного комплекса СКИФ, включающего основное кольцо, бустерный синхротрон, линак и два канала транспортировки пучка представлен в **Таблице 3.6.5.1**. По принципу работы управляемые устройства делятся на три группы:

- Устройства с постоянными параметрами: магниты основного кольца и каналов транспортировки, другие элементы постоянного тока или напряжения,
- «Медленно» изменяемые элементы: элементы магнитной структуры и ВЧ бустера,
- Импульсные элементы: устройства впуска/выпуска пучка, импульсные элементы в каналах транспортировки, импульсные элементы линака и пушки.

Из-за разницы в требованиях на точность управления и в количестве измеряемых параметров для управления различными типами устройств используется два типа контроллеров:

- прецизионный контроллер источника питания ПКИП, обеспечивающий точность аналогового управления основного выходного параметра источника питания относительно его полного диапазона лучше, чем  $10^{-5}$  и синхронные измерения с этой же точностью с частотой до 10 кГц нескольких параметров источника,
- модульный (встраиваемый) контроллер источника питания МКИП, обеспечивающий относительную точность управления  $10^{-4}$ , одновременные синхронные измерения с частотой до 10 кГц и точностью  $10^{-4}$ , как минимум, трех параметров управляемого устройства.

Управление постоянными магнитными элементами должно обеспечивать установление и поддержание нужного уровня выходного параметра источника питания (тока), а также

плавное перемагничивание магнитных элементов с целью точного воспроизведения необходимых величин магнитных полей после существенных изменений тока в обмотках элементов.

Для элементов бустера требуется управление быстрой (доли секунды) синхронной перестройкой уровней выходных параметров элементов с целью обеспечения ускорения пучка.

Управление импульсными элементами обеспечивает процедуру заряда накопителей энергии, стабилизацию значения напряжения на заданном уровне к моменту срабатывания (выстрела), синхронизацию запуска устройств, а также стабилизацию импульсных полей в магнитах в момент пролета пучка.

**Таблица 3.6.5.1.** Список управляемых устройств ускорительного комплекса СКИФ.

Устройство	Число	Ист.питания	Контроллер
<b>Основное кольцо</b>			
Диполи	1-2	DC	ПКИП
Элементы основной оптики	20	DC	- / -
Элементы компенсации нелинейностей	10	DC	- / -
Элементы коррекции оптики	300	DC	МКИП
Элементы коррекции орбиты	200	DC	МКИП
Элементы для быстрой коррекции орбиты	100	AC	МКИП
ВЧ система	1	DC	LLRF
<b>Кольцо бустера</b>			
Диполи	1-2	AC	ПКИП
Элементы основной оптики	3	AC	- / -
Элементы компенсации нелинейностей	16	AC	- / -
Элементы коррекции орбиты пучка	36	AC	МКИП
ВЧ система	1	AC	LLRF
<b>Система впуска/выпуска</b>			
Магниты-септумы	3	Имп. до 3 кВ	ПКИП
Магниты-кикеры	12	Имп. до 30 кВ	МКИП
Импульсные корректоры орбиты	4	Имп. до 3 кВ	МКИП
<b>Каналы транспортировки</b>			
Диполи	10	DC	ПКИП
Элементы основной оптики	20	DC	МКИП
Корректоры	30	DC	МКИП
Электронная пушка	1	DC	МКИП

Отдельно выделяется группа сверхпроводящих элементов (устройств генерации излучения), управление которыми выполняется по алгоритмам, сходным с алгоритмами управления элементами магнитной структуры основного кольца.

Список устройств диагностики пучка, электроника которых составляет часть системы управления, представлен в **Таблице 3.6.5.2**.

**Таблица 3.6.5.2.** Список диагностического оборудования СКИФ.

Название устройства	Кол-во	Назначение
DCCT	2	Direct Current Current Transformer, измерение тока пучка
FCT	3	Fast Current Transformer, измерение структуры пучка в каналах транспортировки и ускорительных кольцах
Пикап	~200	Измерение орбиты и однооборотных треков пучка, измерение бетатронных частот в ускорительных кольцах
Монитор СИ (SLM)	2	Наблюдение поперечных размеров пучка и координат орбиты в ускорительных кольцах
Люминофорный датчик	20	Однократное наблюдение пролета пучка по каналам транспортировки и в ускорительных кольцах
Пролетные датчики	20	Измерение поперечной координаты траектории пучка и тока пучка в каналах транспортировки
Система измерения частот	1	Измерение бетатронных частот в бустерном синхротроне

### 3.6.6 Управление источниками питания

Схема, отображающая программно-аппаратные связи подсистемы управления источниками питания приведена на **Рисунке 3.6.6.1**. Все постоянные источники питания элементов магнитных систем основного кольца, кольца бустера и каналов транспортировки, а также импульсные источники питания управляются контроллерами, обладающими следующими основными функциональными свойствами:

- возможность обработки вэйвформы со значениями уставок, заранее загруженной в память контроллера, по внешним клокам Set с частотой следования до 10 кГц,
- непрерывные измерения с помощью встроенных АЦП заданных параметров источников питания по внешним клокам Set,
- отправка вэйвформ с измеренными значениями в компьютер по внешним клокам Send с частотой следования порядка 1 Гц.

Интерфейс контроллеров – Ethernet 1 Гб. Все контроллеры источников питания обслуживаются с помощью ИОС, которые:

- обрабатывают значения переменных PV (Process Variables), содержащих загружаемые данные, и загружают эти данные в контроллеры,
- принимают от контроллеров измеренные данные в виде вэйвформ, обрабатывают и формируют соответствующие PV,
- высылают в контроллеры различные команды, определяющие режимы их работы.

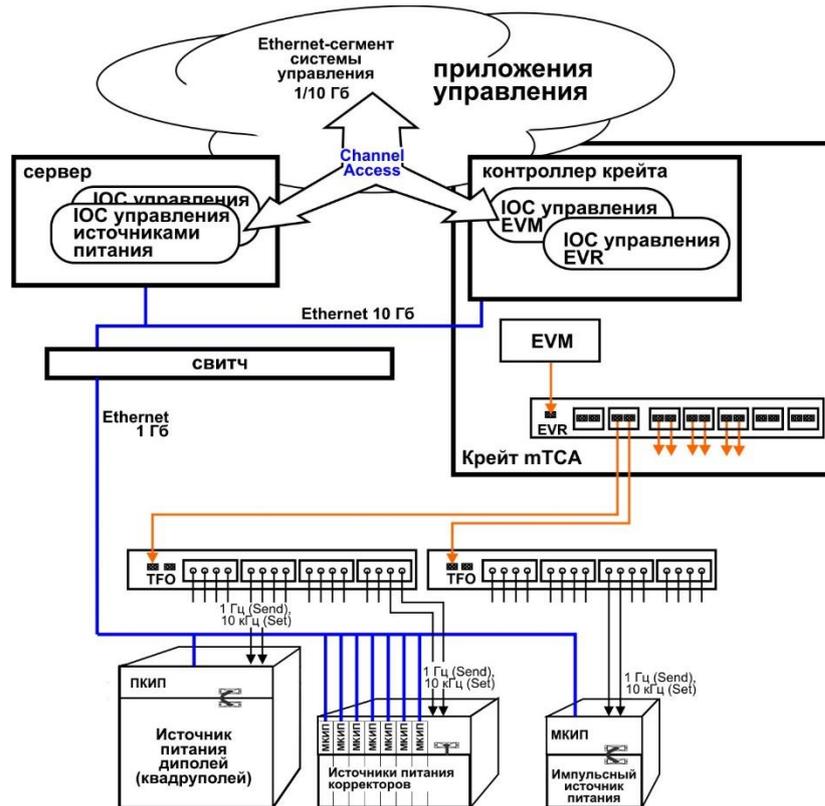


Рисунок 3.6.6.1. Программно-аппаратная схема управления источниками питания магнитной системы ускорительных колец и каналов транспортировки пучка.

От блоков синхронизации EVR через размножители TFO на контроллеры поступают клоки 10 кГц (Set), определяющие частоту опроса АЦП, занесения кодов в ЦАП, а также клоки 1 Гц (Send), инициирующие отправку контроллерами в компьютер вэивформ с измерениями. Управление и диагностика источников питания выполняется приложениями верхнего уровня, которые получают доступ к PV по протоколу Channel Access.

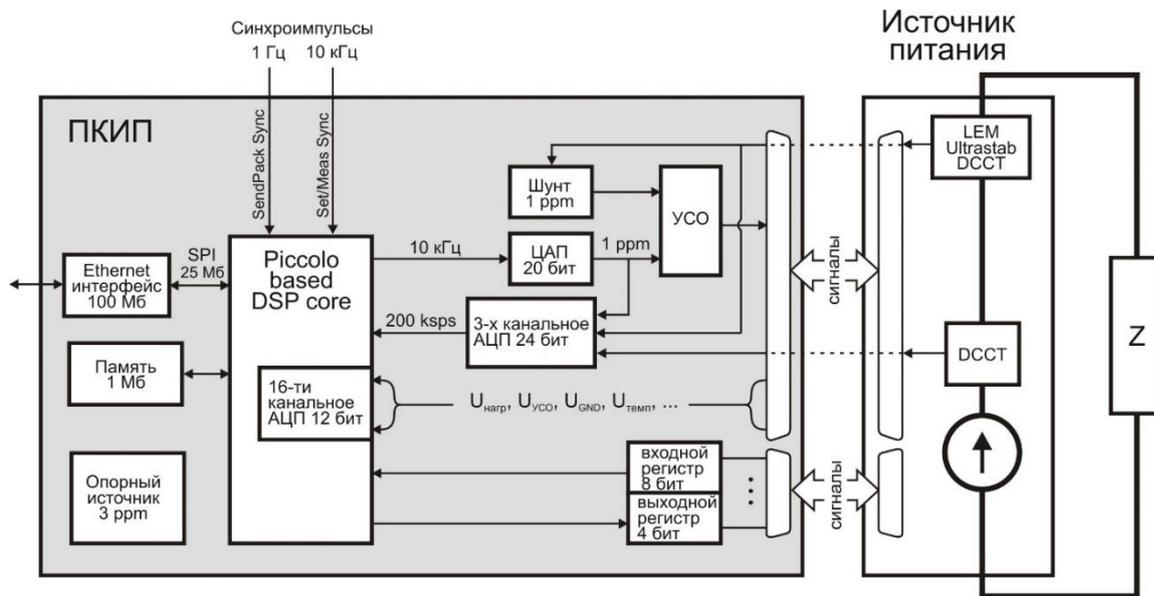
**Прецизионный контроллер источника питания ЦКИП** предназначен для работы с устройствами, требующими относительной точности и стабильности управления (измерения) параметрами лучше, чем  $10^{-5}$  (точность определяется относительно полного диапазона изменения значений параметров). Основные технические характеристики ЦКИП:

- Интерфейс: Ethernet (не менее 1 Гб).
- ЦАП: 20 бит, точность лучше  $10^{-5}$ .
- Три канала АЦП, частота измерения по каждому каналу не менее 10 кГц, 20 значащих бит, точность лучше  $10^{-5}$ . Шесть каналов АЦП, частота измерения по каждому каналу не менее 10 кГц, 16 значащих бит, точность  $10^{-4}$ .
- Уровень аналоговых сигналов: от -10 до 10 В.
- Наличие входных (DI) и выходных (DO) бинарных регистров.
- Два входа для внешних клоков: Set:  $\sim 10$  кГц, для тактирования ЦАП и АЦП; синхронизации отработки вэивформы (задания значений) и выполнения измерений.

Send: ~1 Гц, для отправки пакетов с измерениями АЦП в серверный компьютер. Для бустера клок Send используется также для старта отработки вэйвформы.

- Изменяемый диапазон частоты задания значений вэйвформы в ЦАП (частота Fset): от 1 Гц до 10 кГц.
- Наличие внутренних клоков Set и Send для обеспечения автономной работы блока в отсутствие внешних клоков.
- Максимальная длина вэйвформы уставок: не менее 100000 значений для отработки длинных сложных процессов.
- Для отработки вэйвформы предусмотрен задаваемый делитель Dwf частоты клоков Fset. Полученная частота  $F_{wf} = F_{set}/D_{wf}$  используется для занесения значений из вэйвформы в ЦАП.
- Прием широковещательного пакета с командами «старт/стоп отработки».
- Для передачи данных использование транспортного протокола на базе TCP/UDP.

Пример блок-схемы контроллера представлен на **Рисунке 3.6.6.2**.



**Рисунок 3.6.6.2.** Блок-схема управления источником питания с помощью прецизионного контроллера.

Имеется два режима работы контроллера: «отработка вэйвформы» и «отработка уставки».

Режим отработки вэйвформы производится по внешним/внутренним клокам вэйвформы, заранее загруженной в память устройства. Старт отработки - после получения команды от компьютера + после прихода очередного блока Send + по приходу очередного блока Set. Для старта может быть использован блок Send. Длина вэйвформы задается вместе с загрузкой самой вэйвформы. Возможность остановить отработку вэйвформы по команде от компьютера, в этом случае устройство по отработке вэйвформы переходит в состояние ожидания. Возможность разрешить продолжение отработки вэйвформы по команде от компьютера (возврат к отработке вэйвформы). Старт продолжения синхронизируется по той же схеме, что и начальный старт отработки вэйвформы. Окончание отработки вэйвформы - по

исчерпанию ее длины. При приходе команды на старт отработки контроллер начинает обрабатывать вэйвформу заново. То же касается использования для старта отработки блока Send. Возможность загрузки трех вэйвформ: две вэйвформы для отработки и одна переходная вэйвформа. Из двух вэйвформ для отработки одна является основной, которая используется в текущей ситуации для отработки, вторая вэйвформа используется для загрузки новой вэйвформы от компьютера. Возможно переключение между вэйвформами для отработки, тогда их назначения меняются местами. Возможна отработка переходной вэйвформы при переключении между вэйвформами. Есть возможность зацикливания отработки рабочей вэйвформы. Возможность добавить для отработки отдельно заданное значение ко всем значениям обрабатываемой вэйвформы (смещение для обеспечения динамической коррекции от компьютера). Отдельное значение учитывается в отработке, но не изменяет значений загруженной вэйвформы. Так же, есть возможность линейной интерполяции при отработке шагов. Интерполяция выполняется приблизительно с использованием протяженности интервала времени, измеренного между приходом последовательных блоков Set. Если величина рассчитанного интерполированного сигнала достигает следующей точки вэйвформы, изменение сигнала прекращается до прихода следующего тактового сигнала. Если, наоборот, величина сигнала к моменту прихода очередного тактового сигнала не достигает следующей точки вэйвформы, то в момент прихода такта происходит скачок сигнала ЦАП в очередную точку вэйвформы.

В режиме отработки уставки значения обрабатываются за указанное время. Время задается числом тактов, за которые уставка должна быть отработана. Продолжительность тактов определяется блоками Set и делителем Dwf. Если время задано = 0, то отработка выполняется мгновенно после получения команды на отработку (или прихода блока Set). Иначе, делается пошаговая отработка за указанное число тактов. Как и в случае отработки вэйвформы между тактами можно использовать линейную интерполяцию. Имеется возможность ограничения выходного напряжения ЦАПа: возможность задать значение, которое ограничит суммарное выходное напряжение ЦАПа. Бинарные регистры DOUT и DIN доступны для записи и чтения всегда. Возможность высылать значения регистров DIN по их изменению. Все каналы АЦП всегда измеряют свои сигналы в непрерывном режиме с частотой не менее 10 кГц. Измерения обрабатываются по определенному числу измерений  $N_m$ , и результаты для каждого канала АЦП укладываются в свою вэйвформу с заданной периодичностью. Для каждого канала АЦП задается свое число измерений для обработки  $N_{m_i}$ . По приходу блока Send вэйвформы с измерениями после отработки установленной задержки  $D_{tm}$  высылаются в компьютер. В высылаемом пакете указывается длина вэйвформы. В режиме синхронизации от внешних блоков в отсутствие блоков Send в контроллере в вэйвформах с измерениями всегда содержится некоторое количество последних измерений, соответствующее интервалу, немного превышающему 1 сек, но вэйвформы в компьютер высылаются только в случае прихода блока Send или по команде от компьютера. Есть, также, возможность задавать коэффициент прореживания заполнения высылаемой вэйвформы с измерениями  $K_f$ , что обеспечит оперативную регулировку частоты заполнения каждой из вэйвформ. Максимальная частота заполнения соответствует частоте поступления блоков Set. Имеется возможность чтения статусного состояния контроллера (текущие измерения всех

АЦП, состояние регистров и т.д. по команде от компьютера. Статусное состояние также высылается автоматически по приходу клона Send.

**Модульный контроллер источника питания МКИП** предназначены для работы с устройствами, требующими относительной точности и стабильности управления (измерения) ниже, чем  $10^{-4}$ : источники питания обмоток коррекций и отдельных корректоров, элементы электростатики и т.п.

Как и в случае ПКИП точность определяется относительно полного диапазона изменения значений параметров. Определение «модульный» подчеркивает то, что каждый контроллер в виде модульной платы размещается внутри или в каркасе «своего» источника питания.

Основные технические характеристики и функции управления у МКИП те же, что и у ПКИП. Отличие состоит только в конфигурации контрольно-измерительных каналов: разрядность ЦАП: 16 бит, точность  $10^{-4}$ ; наличие шести каналов АЦП, частота измерения по каждому каналу не менее 10 кГц, 16 значащих бит, точность  $10^{-4}$ . Дополнительная функция управления касается возможности включения контроллера в систему быстрой обратной связи и возможности задать для отработки дополнительное смещение выходного управляющего сигнала с помощью входного аналогового сигнала. Входной аналоговый сигнал оцифровывается одним из каналов АЦП и суммируется с текущим (обрабатываемым) значением.

При управлении импульсными устройствами требуется контролировать (измерять и сравнивать) значения импульсных параметров, являющихся основной характеристикой устройства, например, величину тока или поля в магните в момент пролета пучка. Наблюдение за параметрами такого рода требует использования АЦП осциллографического типа, чтобы можно было видеть изменение параметра во времени и измерять величину параметра в привязке к пролету пучка.

В случае относительно продолжительных сигналов (единицы микросекунд и более) эффективным способом измерения является интегрирование сигнала с петли, заложенной в магните в используемую область поля. В случае интегрирования по времени сигнала напряжения с петли можно получить значение магнитного поля в момент окончания процедуры интегрирования. Интегрирование останавливается по приходу импульса, который появляется в момент пролета пучка.

В случае сигналов, длительность которых меньше 1  $\mu$ s (сигналы с пластин кикеров), для измерения используется АЦП с высоким разрешением по времени ( $\sim 100$  МГц и выше), которое запускается синхронно с движением пучка. Для контроля стабильности работы по времени системы впуска/выпуска необходимо иметь реперный сигнал от пролета пучков по соответствующим каналам транспортировки.

### 3.6.7 Управление высокочастотной ускоряющей системой

Для управления ВЧ-напряжением на резонаторах и его фазой, как правило, используются специализированные контроллеры, учитывающие особенности компоновки ВЧ-систем, а также сценарии их работы. На западе такие контроллеры принято называть Low

Level RF controller (LLRF). Точность регулировки параметров ВЧ (амплитуда напряжения на резонаторе, фаза ускоряющего напряжения) требуется порядка  $10^{-3}$ . Контроллеры LLRF имеют интерфейс Ethernet.

Контроллер, управляющий ВЧ-системой бустера, для обеспечения синхронизма работы магнитной системой должен уметь обрабатывать задания уставок в виде вэйвформ, которые должны соответствовать вэйвформам, обрабатываемым элементами магнитной системы. Контроллер, управляющий ВЧ-системой основного кольца, должен обеспечивать плавное изменение амплитуды и фазы ускоряющего напряжения на резонаторах.

Так как для управления различными электронными (накалы, напряжения смещения и т.п.) и механическими настройками ВЧ-системы не требуется высоких точностей и малых времен отработки (менее единиц миллисекунд), то для этой цели рационально использовать модули PLC, которые обеспечат высокую надежность и долговечность цепей управления, а в случае необходимости - ее расширяемость и преемственность.

### 3.6.8 Управление оборудованием диагностики пучка

Как правило, при разработке систем ускорителя, диагностику пучка не включают в состав системы управления. Но это верно только в части описания физических принципов выполняемых измерений и первичной обработки сигналов с датчиков, а также технических решений, касающихся самих измерительных устройств (датчиков, усилителей сигнала, оцифровки сигналов, поступающих с датчиков). В остальном рассмотрение диагностики пучка невозможно вне связи с системой управления. Разработка интерфейсов с компьютером, синхронизация и взаимодействие программ, выполняющих получение и обработку диагностических данных, с управляющими программами составляет часть задач по проектированию системы управления.

Устройства диагностики пучка описаны в соответствующей главе. Ниже приведен перечень электроники, предназначенной для работы с указанными устройствами, которая либо относится к системе управления, либо тесно с ней взаимодействует:

#### DCCT

- АЦП осциллографического типа с разрешением 24 бит по амплитуде и 0.1 мс по времени (HRD на **Рисунке 3.6.1.2**) для оцифровки сигнала, поступающего с электроники (усилитель, управляемые регистры), входящей в комплект DCCT,
- (в случае необходимости) ЦАП для калибровки DCCT\*),
- (в случае необходимости) многоканальный дискретный регистр вывода для переключения диапазона усилителя измеряемого сигнала и режима работы электроники\*),
- канал ГЗТ для старта измерений АЦП.

\*) Может быть реализовано с использованием модулей PLC.

#### FCT

- - АЦП осциллографического типа с разрешением 8-10 бит по амплитуде и 0.5 нс по времени (HSD на **Рисунке 3.6.1.2**) для оцифровки сигнала, поступающего с датчика. Рационально использование серийного осциллографа с полосой 2 ГГц,
- - канал ГЗТ для старта измерений АЦП (осциллографа).

Датчик положения пучка (пикап)

- - специализированная пикап-станция - ВРМ-контроллер,
- - дискретный регистр вывода для переключения режима работы пикап-станции,
- - канал ГЗТ для старта обработки сигналов в режиме поворотных измерений.

Скрепер

- - многоканальный дискретный регистр вывода для управления движением актуатора,
- - многоканальный дискретный регистр ввода для контроля состояния актуатора,
- - АЦП для измерения положения актуатора.

Люминофорный датчик

- камера,
- канал ГЗТ для запуска камеры,
- многоканальный дискретный регистр вывода для управления движением актуатора,
- многоканальный дискретный регистр ввода для контроля состояния актуатора,
- АЦП для измерения положения актуатора.

Пролетный датчик

- специализированный контроллер для оцифровки сигнала с датчика,
- канал ГЗТ для старта работы контроллера.

Система измерения частот в бустере

- специализированный контроллер для управления раскачкой пучка и для обработки сигналов с датчика,
- канал ГЗТ для старта работы контроллера.

Монитор СИ (SLM) в бустере

- цифровая камера,
- канал ГЗТ для старта камеры,

Монитор СИ (SLM) в основном кольце

- цифровая камера.

Пикап-станция датчика положения пучка должна поддерживать три режима работы:

- непрерывное измерение усредненного поперечного положения пучка с частотой 10 кГц и точностью лучше 1 мкм в области пикап-электродов для восстановления орбиты пучка в основном кольце,
- непрерывное измерение усредненного поперечного положения пучка с частотой 10 Гц для определения орбиты пучка в основном кольце с точностью не хуже 0.1 мкм,

- пооборотные многократные (не менее 10000 оборотов) измерения поперечного положения пучка по старту от внешнего триггера для построения траекторий движения пучка на обороте с точностью не хуже 10 мкм и для вычисления частот бетатронных (точность не хуже 0.0001) и синхротронных (точность не хуже 0.001) колебаний, что подразумевает встроенное в контроллер фурье-преобразование с уточнением.

С точки зрения взаимодействия с системой управления к пикап-станции предъявляются следующие требования: интерфейс Ethernet 1 Гб, возможность управления режимами работы и конфигурирования от компьютера, привязка измерений к клокам Set (10 кГц), отправка массивов с измерениями в компьютер по клокам Send (1 Гц), интерфейс для включения в систему подавления пульсаций.

Специализированная система непрерывного измерения бетатронных частот не кажется актуальной для циклического ускорителя, работающего на постоянной энергии. Использование пикап-станции и удара, например, впускным кикером по пучку для возбуждения когерентных колебаний дает лучший результат по точности измерений частот. Но применение такой системы на кольце бустерного синхротрона вполне оправдано, поскольку система позволяет выполнять измерения с частотой порядка 1 кГц, что может быть востребовано для настройки работы с пучком. Прототипом системы измерения частот может служить система, которая была установлена на бустере NSLS-II [23]. Для взаимодействия с системой управления специализированный контроллер должен удовлетворять следующим условиям: интерфейс Ethernet 1 Гб, возможность управления режимами работы и конфигурирования от компьютера, старт цикла измерений по внешнему триггеру или по команде от компьютера, автоматическая отправка массивов с измерениями в компьютер сразу по окончании цикла измерений.

Для измерения поперечного положения и величины заряда пучка в каналах транспортировки используются пролетные датчики тока изображения пучка. Датчики должны обеспечивать точность измерения положения центра тяжести пучка не хуже 0.1 мм.

С точки зрения взаимодействия с системой управления специализированный контроллер должен удовлетворять требованиям, аналогичным требованиям к контроллеру измерения частот.

В качестве пролетного датчика другого типа для измерения структуры пучка можно использовать FCT. Такая система позволит измерять побанчевую структуру и величину заряда, а также обеспечит реперный сигнал для мониторинга стабильности работы системы перепуска. Для использования FCT не требуется разработки специализированного контроллера. Сигнал с датчика, измеренный «быстрым» АЦП (с полосой ~ 2 ГГц) или осциллографом, можно обработать на уровне пользовательского приложения.

### 3.6.9 Системы обратной связи

**Система подавления поперечных колебаний** необходима для уменьшения времени их затухания после впуска очередного сгустка или трейна сгустков с десятков миллисекунд до микросекунд и, тем самым, для улучшения захвата пучка. Такая система также полезна для подавления неустойчивостей, возникающих из-за большого заряда пучка. Постоянная

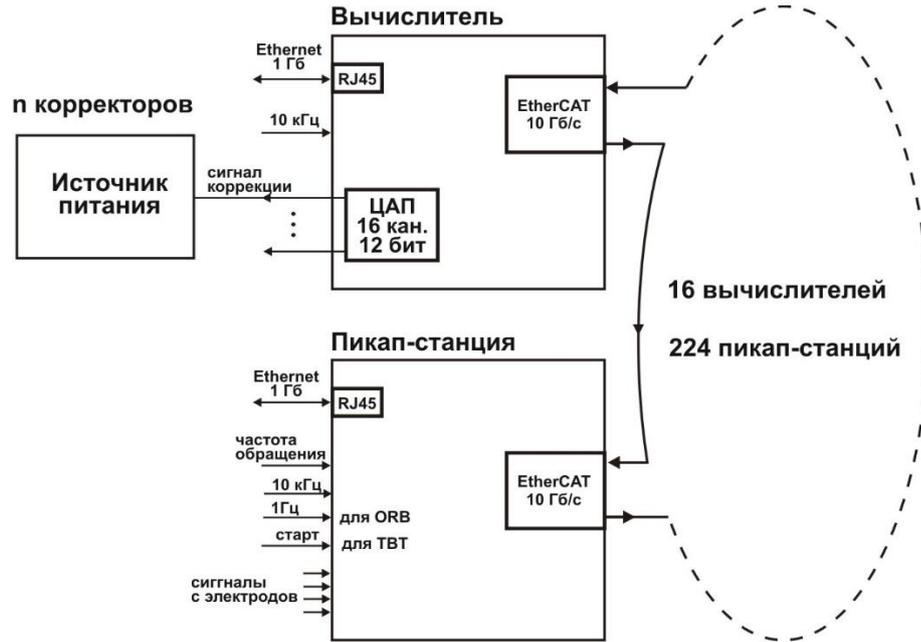
надежная работа системы снизит радиационную нагрузку на элементы ускорителя от гибнущих частиц. Для управления подавлением колебаний необходимо разработать специализированный контроллер [24], который соответственно величине сигнала, измеренного специальным пикапом, будет воздействовать на ту область циркулирующего пучка, в которой возникли колебания с наибольшей амплитудой.

Для подавления возможных отклонений орбиты пучка, связанных с недостаточной стабильностью работы источников питания, механическими колебаниями элементов кольца служит **система быстрой стабилизации поперечного положения пучка**, включающая в себя систему измерения положения пучка, быстрые корректоры орбиты пучка, а также специализированные контроллеры (вычислители), которые, используя измерения орбиты, выполняемые пикап-станциями с частотой 10 кГц, вычисляют добавки тока в элементы коррекции орбиты и с частотой до нескольких килогерц выдают корректирующие сигналы в контроллеры источников питания быстрых корректоров. Пример возможной схемы компоновки элементов системы стабилизации орбиты приведен на **Рисунке 3.6.9.1**.

Пикап-станции, работающие в режиме измерения орбиты, по блокам 10 кГц выполняют измерения и вычисления координат поперечного положения ( $X$ ,  $Y$ ) и величины тока пучка. После вычисления выполняется процедура передачи данных в вычислители. Каждый вычислитель, используя данные, полученные от пикап-станций, вычисляет поправки для соответствующих корректоров и задает вычисленные поправки в каналы своего многоканального ЦАПа. Выходные напряжения ЦАПов, встроенных в вычислители, управляют работой источников питания быстрых корректоров. В режиме измерения орбиты (ORB) пикап-станции по блокам Send (1 Гц) отправляют данные в управляющий компьютер. Таким образом на уровне пользовательских программ обеспечивается работа с измеренной орбитой. При работе пикап-станций в режиме поворотных измерений (ТВТ) отправка данных в вычислители не выполняется.

Всего в системе быстрой коррекции задействовано 224 пикап-станции (по 14 пикап-станций на суперпериод накопителя), 16 вычислителей (по одному вычислителю на суперпериод) и по  $n$  корректоров на суперпериод. Все пикап-станции и вычислители соединены по кольцевой схеме с помощью EtherCAT G, работающего на скорости 10 Гбит/с.

Сценарий работы системы быстрой коррекции выглядит следующим образом. Есть выделенный вычислитель (мастер), который по приходу очередного блока Set (10 кГц) отправляет в EtherCAT пару пакетов для обмена данными, которые последовательно проходят по кольцу через все пикап-станции и вычислители. Первый пакет отправляется для сбора данных с пикап-станций о координатах  $X$ ,  $Y$  и величине тока пучка. При этом каждая пикап-станция свои данные складывает в пакет “на лету”. Второй пакет требуется отправить для распространения собранной информации по всем вычислителям.



**Рисунок 3.6.9.1.** Блок-схема подключения контроллеров в системе быстрой стабилизации орбиты пучка.

Длина каждого пакета составляет:  $224 * (2 \text{ байта } X + 2 \text{ байта } Y + 2 \text{ байта} - \text{величина тока пучка}) = 1344 \text{ байта}$ . Время прохождения пакета по кольцу составляет:

$$(1344 * 8 * 2 / 10 \text{ (время на отправку и прием пакета мастером)} + 500 * 5 \text{ (время распространения по кабелю)} + (224 + 16) * 10 \text{ (задержка на модулях)}) / 1000 = 7 \text{ мкс.}$$

Итого, полное время, требующееся для обмена данными, составляет около 15 мкс.

Если после появления блока 10 кГц через определенное время какое-либо из устройств не получит пакет, оно вышлет в управляющий компьютер статус «отсутствие пакета». Получив данные, вычислитель считает матрицу и в результате получает значения новых добавок в «свои» корректоры для исправления орбиты. Затем вычислитель с уменьшающим коэффициентом заносит эти поправки в каналы ЦАПа. По мере изменения режима работы накопителя в вычислители загружаются соответствующие орбиты цели. Таким образом, система коррекции орбиты может функционировать всегда, когда в кольце накопителя есть пучок.

Пример подобной реализации: на NSLS-II вычисление в вычислителе (cell controller) матрицы 180 пикапов x 270 корректоров занимает 10 мкс и выполняется одновременно в 30 вычислителях.

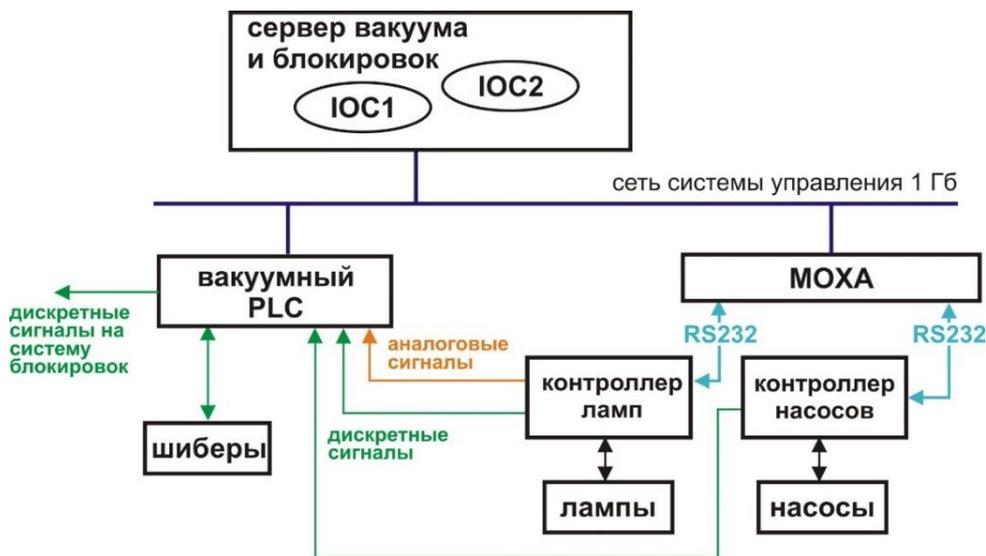
### 3.6.10 Управление вакуумной системой

Вакуумное оборудование подключается к компьютерам системы управления через Ethernet. В случае использования фирменных контроллеров насосов типа Varian 929-7011, контроллеров вакуумных лам типа MKS937B и другого оборудования, имеющего интерфейсы

типа RS-232, -485, для подключения применяются терминальные серверы MOXA, которые транслируют данные между различными интерфейсами и Ethernet. Блок-схема подключения вакуумного оборудования представлена на **Рисунке 3.6.10.1**.

Управление вакуумным оборудованием осуществляется с помощью сервера, который также обслуживает аппаратуру системы блокировок. ИОС, работающие в этом сервере, осуществляют взаимодействие со всеми контроллерами оборудования: загружают в них изменившиеся настройки, периодически считывают данные о состоянии устройств и результаты различных измерений, которые выполняют контроллеры.

Вакуумные шиберы контролируются при помощи PLC. В регистры ввода PLC заводятся дискретные сигналы о положении шиберов, дискретные сигналы блокировок с контроллеров насосов и ламп, а также аналоговые сигналы с контроллеров ламп, соответствующие уровню измеренного вакуума. Все эти сигналы в PLC используются для принятия решения на управление положением автоматических шиберов. В сервере работают ИОС, которые взаимодействуют с PLC через Ethernet: загружают в них настройки, периодически считывают данные о состоянии и измерения.



**Рисунок 3.6.10.1.** Блок-схема подключения вакуумного оборудования.

### 3.6.11 Управление сигналами блокировок

Для управления сигналами блокировок предполагается использовать несколько узлов PLC, которые подключены к серверу, одновременно управляющему и вакуумной системой. Блок-диаграмма управления системой блокировок представлена на **Рисунке 3.6.11.1**. Взаимодействие с электроникой осуществляется с помощью ИОС, который считывает данные о состоянии всех узлов PLC, задействованных в системе. Сигналы от датчиков, участвующих в системе блокировок ускорителей и каналов транспортировки (термоключи, терморезисторы, гидрореле и т.п.), либо приходящие от других блокировочных систем поступают на аналогово-цифровые входы модулей и обрабатываются в процессорах PLC. Решения выдаются в виде дискретных сигналов и поступают, либо на исполняющие устройства (источники питания), либо в другие исполнительные системы или узлы PLC, например, в PLC УБС.

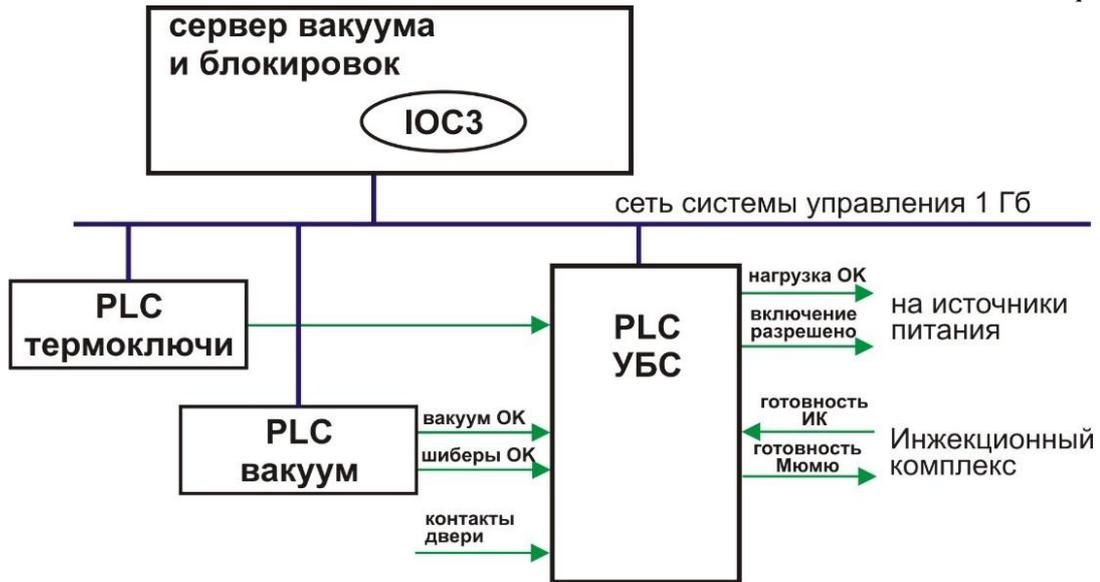


Рисунок 3.6.11.1. Блок-диаграмма системы блокировок.

На **Рисунке 3.6.11.1** показан принцип формирования выходных сигналов, когда решение формируется по сигналам, поступающим от нескольких PLC, например, для выдачи сигнала готовности бустера к приему пучка PLC УБС использует сигналы от PLC, обслуживающего термоклучи, установленные на нагрузках и вакуумной камере, а также сигналы от вакуумного PLC о том, что вакуум в норме, и шиберы ускорительных колец и каналов транспортировки открыты.

Время обработки сигналов (дискретных и аналоговых) в PLC составляет от миллисекунд до десятков миллисекунд, что определяется архитектурой системы, производительностью процессора PLC, а также свойствами самих модулей. Поэтому блокировки, использующие PLC, относятся к категории «медленных» блокировок. В случае необходимости организации быстро срабатывающих блокировок (доли миллисекунды и менее) необходимо использовать другие специальные решения.

С помощью PLC на пульте можно организовать наглядную индикацию о состоянии систем комплекса, которая не будет зависеть от работы программного обеспечения в компьютерах системы управления.

### 3.6.12 Программное обеспечение

При создании ПО СУ крупным ускорительным комплексом разработчики стараются использовать специальные программные платформы, обеспечивающие базовую программную инфраструктуру и выполнение многих функций, обязательных для СУ, например, таких, как обеспечение взаимодействия с оборудованием, обмен данными между программами. При этом изыскиваются возможности применения наработок, сделанных ранее для других систем управления. Для построения системы управления ускорительным комплексом источника СИ СКИФ в качестве базовой программной платформы выбрана платформа EPICS.

ПО построено по трехуровневой схеме (Рисунок 3.6.12.1). Верхний пользовательский уровень включает операторские приложения, обеспечивающие управление ускорительным комплексом и визуализацию параметров устройств и пучка, приложения, определяющие сценарий работы установки, приложения для работы с режимами, программы для моделирования параметров магнитной системы и пучка и т.п. Приложения пользовательского уровня работают, в основном, в операторских компьютерах.

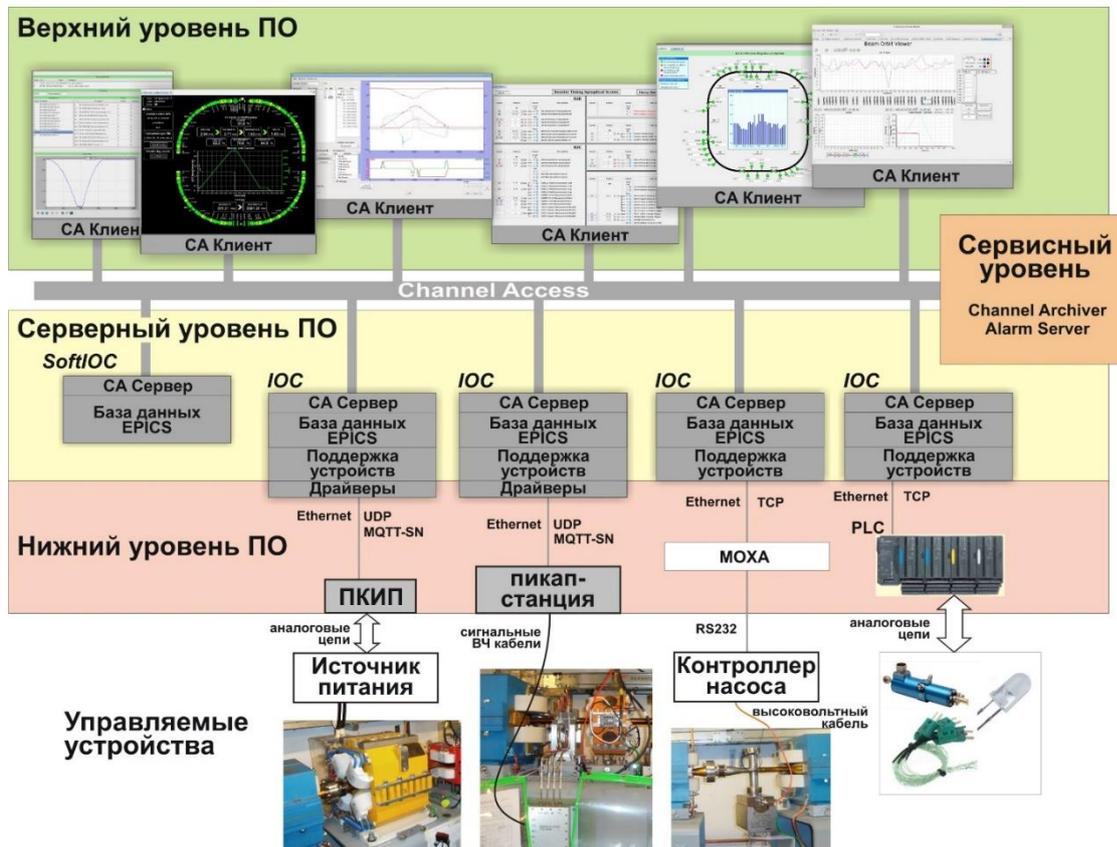


Рисунок 3.6.12.1. Структура ПО системы управления.

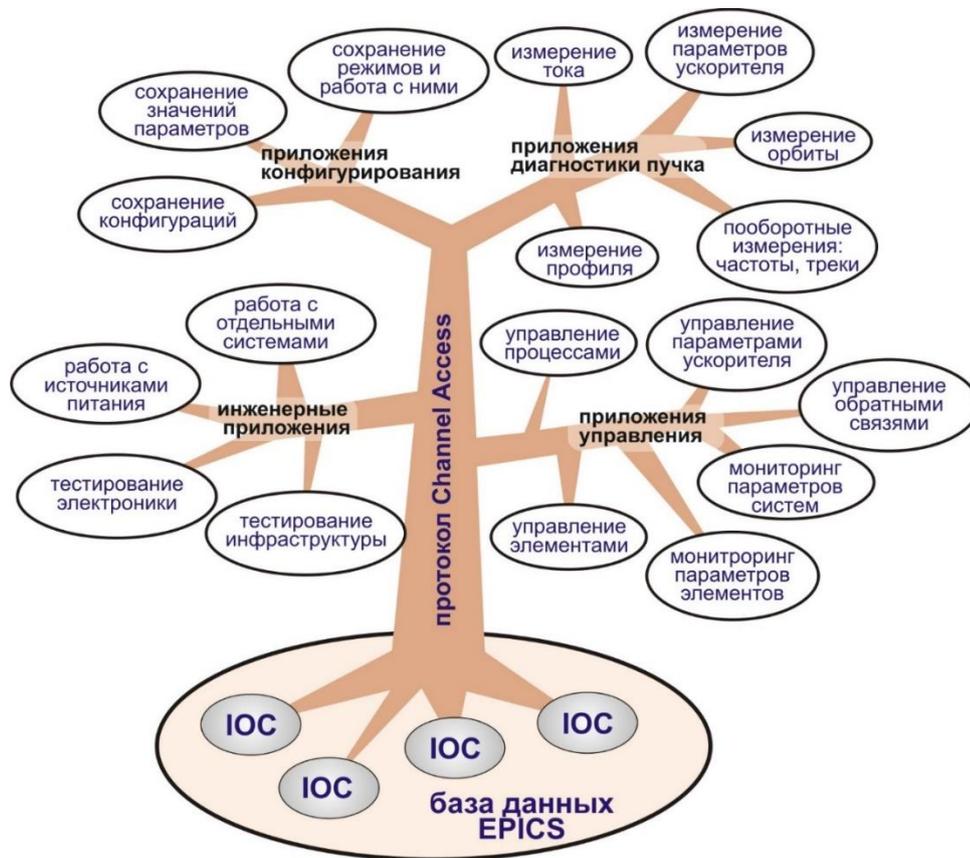
На среднем (серверном) уровне работают программные серверы IOC (Input/Output Controller), которые обеспечивают взаимодействие с контроллерами оборудования и электроникой, выполняют обработку данных, полученных из (загружаемых в) оборудование и предоставляют доступ к данным для приложений верхнего уровня через протокол Channel Access. К серверному уровню можно отнести приложения для централизованных сервисов, например, для архивирования параметров установки и пучка в базу данных, для поиска имен переменных, для обеспечения обмена данными с другими системами управления и т.п., которые могут рассматриваться, как отдельный сервисный уровень.

Нижний уровень системы управления составляет встроенное программное обеспечение контроллеров и электроники, которое выполняет оцифровку и первичную обработку измеряемых сигналов, обеспечивает взаимодействие с серверными программами и поддерживает логику работы аппаратуры. Программная часть интерфейса со стороны серверного уровня (со стороны IOC) включает device support и соответствующие драйверы, разработанные для каждого типа периферийных устройств.

Для обеспечения связи между программными компонентами системы управления используются следующие программные интерфейсы:

- транспортные протоколы TCP и UDP для связи между ПО, работающим в контроллерах оборудования, и ПО серверного уровня,
- прикладной протокол MQTT/MQTT-SN для связи между ПО нижнего уровня, работающего в специализированных контроллерах, управляющих оборудованием, с ПО среднего, серверного уровня,
- прикладной протокол Channel Access для связи ПО среднего и верхнего уровня, а также для связи между компонентами ПО на среднем и верхнем уровне.

Структура пользовательских приложений в виде дерева показана на **Рисунке 3.6.12.2**.



**Рисунок 3.6.12.2.** Структура пользовательских приложений.

Структура пользовательского ПО (верхний уровень ПО) строится поверх серверного (базового) уровня ПО, который, в свою очередь, основывается на компонентах и функциональности, предоставляемой платформой EPICS: прежде всего, это программный сервер ИОС, компоненты которого в виде PV составляют так называемую «базу данных» EPICS, а также протокол взаимодействия и обмена данными Channel Access (CA). На **Рисунке 3.6.12.2** это базовое ПО условно изображено в виде основы ствола дерева. Ветви дерева означают группы пользовательских приложений, которые, используя CA, имеют доступ к данным, получаемым из аппаратуры, а также могут загружать в аппаратуру данные, необходимые для управления. Листья дерева соответствуют подгруппам приложений,

выполняющим определенные функции управления. На данном рисунке приведены далеко не все функции, которые должно выполнять ПО системы управления, но рисунок позволяет в наглядной форме кратко систематизировать ПО с целью упорядочивания дальнейшей его разработки. Для разработки приложений планируется использовать пакет CSS (Control System Studio) и язык программирования Python.

Операторские приложения, необходимые для управления ускорительным комплексом, можно разбить на четыре группы:

1. Инженерные приложения, которые используются как на ранних этапах создания системы, так и во время ее регулярной работы:
  - тестирование инфраструктуры системы управления, включая проверку сетевого оборудования, программных контроллеров ИОС, системы синхронизации и т.п.,
  - тестирование электроники, включая и контроллеры устройств, и сами устройства,
  - работу с источниками питания, эта подгруппа приложений должна обеспечивать возможность полной настройки источников питания, а также их проверки в рабочем режиме, включая долговременный непрерывный мониторинг параметров,
  - работу с отдельными подсистемами, например, с ВЧ-системой, с магнитной системой.
2. Приложения конфигурирования, которые разбиваются на следующие подгруппы, расположенные в порядке их востребованности в процессе создания системы:
  - приложения для конфигурирования элементов ускорительных колец и каналов транспортировки (поиск, просмотр и редакция описания, сохранение и запись в переменные (PV) различных коэффициентов, необходимых для пересчета значений параметров, адресов, диапазонов и т.п.), все параметры элементов должны быть сконфигурированы в виде переменных (PV),
  - приложения для сохранения/восстановления режимов работы устройств и всего комплекса в целом, приложение должно обеспечивать возможность работы с сохраненными режимами (просмотр, сравнение, редакция),
  - приложения для архивирования значений параметров в базу данных с целью обеспечения возможности дальнейшего просмотра и сравнения значений различных параметров за выбранный период времени.
3. Группы приложений для управления установкой, выполняющие следующие функции:
  - управление элементами ускорительных колец и каналов транспортировки с целью настройки работы с пучком,
  - мониторинг параметров элементов: сравнение значений параметров с опорными значениями,
  - управление параметрами ускорителя: изменение бетатронных частот, хроматизма, энергии частиц и т.п.,
  - мониторинг параметров систем: вакуум, блокировки, параметры пучка и т.п.,
  - управление процессами: впуск пучка, загрузка режима работы установки и т.д.,
  - приложения для коррекции орбиты в бустере, основном кольце и каналах транспортировки,

- программы, работающие с аппаратурой, реализующей различные обратные связи для подавления колебаний пучка, стабилизации орбиты.

#### 4. Приложения диагностики пучка:

- измерение тока пучка,
- измерение профилей и структуры пучка (поперечного и продольного),
- пооборотные измерения с помощью удара по пучку (амплитуды колебаний сгустка, бетатронные частоты, синхротронная частота),
- измерение орбиты в кольцах и траекторий пучка в каналах транспортировки,
- измерение параметров колец (хроматизм, бета-функция, энергетический разброс).

Все операторские приложения должны быть доступны через конфигурируемое меню, имеющее привязку к структуре установки и ее систем. Для индикации состояния ускорительного комплекса в целом и его систем должны быть разработаны операторские окна, в которых схематически должно быть отражено состояние всех значимых элементов и основные параметры систем. Все значения, отображаемые на экране в виде чисел или цветом, должны иметь область, нажатие на которую приводит к появлению меню, в котором можно напрямую выбрать инструменты управления или наблюдения для соответствующего параметра. Для управления должно быть реализовано альтернативное использование стрелок, слайдеров, текстовых окон. Должна быть обеспечена возможность оперативной привязки с задаваемыми коэффициентами различных управляемых параметров к одному общему инструменту управления (стрелке или слайдеру).

### 3.7 Система диагностики пучка

Комплекс диагностики электронного пучка СКИФ складывается из диагностических систем линейного ускорителя; электронно-оптических каналов ТК1 и ТК2; диагностических систем бустера и накопителя электронов. Диагностические системы отдельных составляющих СКИФ решают схожие задачи: получение информации о координатах центра тяжести пучка, его размерах, количестве частиц в пучке или отдельном сгустке, времени жизни пучка, локализации областей потерь пучка, спектре колебаний пучка и т.д. В связи с этим в комплексе диагностики пучка СКИФ используются схожие методики измерения параметров пучка, которые, однако, могут отличаться в способах реализации. В **Таблицу 3.7.1** сведены диагностические методы, применяемые на СКИФ, и указано количество устройств, входящих в состав каждой методики измерений параметров пучка. Детали конструкции и основные параметры этих устройств описаны в соответствующих разделах главы.

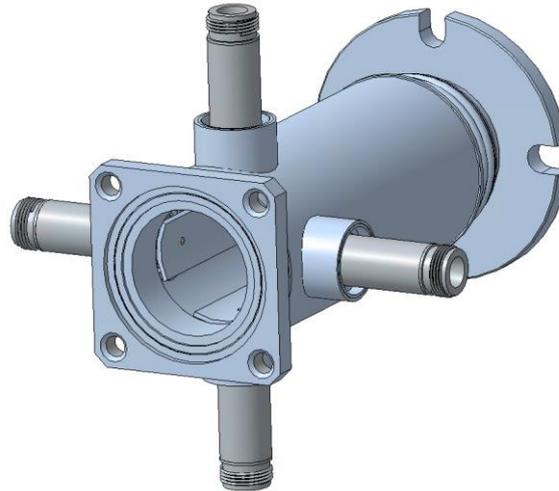
**Таблица 3.7.1.** Перечень ключевых элементов диагностического комплекса СКИФ

Устройство	Кол-во	Назначение
Полосковый датчик положения пучка. Линак 7 шт., ТК1 8 шт., ТК2 18 шт.	33	Измерение траектории пучка
Электромагнитные датчики положения пучка (пикап-электроды). Бустер 37 шт., накопитель 244 шт.	281	Измерение орбиты пучка
Датчик тока ДССТ. Бустер 1 шт., накопитель 1 шт.	2	Измерение среднего тока пучка
Быстрый датчик тока пучка FCT. Линак 3 шт., ТК1 2 шт., бустер 1 шт., ТК2 2 шт., накопитель 1 шт.	9	Измерения заряда пучка
Согласованная полосковая линия 50 Ом. Бустер 2 шт.	2	Измерение бетатронных частот
Система оптической диагностики. Бустер 1 шт., накопитель 1 шт.	2	Измерение поперечных и продольных размеров пучка с использованием синхротронного излучения
Люминофорные экраны. Линак 4 шт., ТК1 5 шт., бустер 6 шт., ТК2 6 шт.	21	Измерение положения и поперечной формы пучка
Стрик-камера	1	Измерение длительности коротких световых импульсов
Цилиндр Фарадея	1	Измерение заряда пучка линейного ускорителя
Магнитный спектрометр	1	Измерение энергии и энергетического разброса пучка линейного ускорителя
Датчик радиационных потерь. ТК1 1 шт., бустер 1 шт., ТК2 1 шт., накопитель 1 шт.	4	Определение места потерь пучка
Пучковый датчик	2	Определение длительности сгустка электронов из линака
Черенковский датчик	3	Определение длительности сгустка электронов из линака

### 3.7.1 Системы измерения положения пучка

Система измерения положения пучка в линаке и каналах перепуска включает в себя электростатические датчики положения пучка (или пикапы) и электронику. Данная система позволяет измерять траекторию пучка после каждого «выстрела» (пролета пучка).

В качестве датчиков положения пучка предлагается использовать полосковые датчики (**Рисунок 3.7.1.1**). Аналогичные датчики были разработаны в ИЯФ для канала перепуска пучка из ВЭПП-3 в ВЭПП-4. Электроды пикапа представляют собой короткозамкнутые на одном конце 50-омные полосковые линии. В качестве вакуумных вводов использованы ввариваемые вакуумные вводы N-типа.



**Рисунок 3.7.1.1.** Полосковый датчик положения пучка.

Количество датчиков в Линаке и каналах и их размеры приведено в **Таблице 3.7.1.1.**

**Таблица 3.7.1.1.** Размеры датчиков положения пучка и их количество.

Установка	Апертура	Длина	Кол-во датчиков
Линак	33 мм	170 мм	7
Канал Линак-Бустер	30 мм	170 мм	8
Канал Бустер-Синхротрон	20 мм	170 мм	18

В ИЯФ разработана электроника для таких датчиков, позволяющая измерять положение пучка после каждого пролета с точностью порядка 10-20  $\mu\text{м}$ , что является вполне достаточным для настройки оптимальных параметров инжектора. На **Рисунке 3.7.1.2** приведена блок-схема электроники, работающей с одним пикапом. На **Рисунке 3.7.1.3** показан основной блок электроники BPM Processor.

Сигналы с электродов пикапов частотой 357 МГц ( $189F_0$ ), проходя через аналоговые каналы с программируемыми коэффициентами передачи (0-30 дБ), далее оцифровываются 16-разрядными АЦП, а затем в цифровом виде поступают в FPGA Cyclon-V, где подвергаются цифровой обработке. FPGA связано двумя мостами со встроенным ARM процессором, в котором работает ОС Linux. Через один из этих мостов FPGA имеет прямой доступ к ОЗУ процессора общей емкостью 4 Gbyte, куда записываются пооборотные данные.

Принцип работы электроники основан на использовании калибровочного сигнала с частотой, равной частоте самого сигнала, который в свою очередь равен частоте ВЧ Бустера 357 МГц ( $189F_0$ ). Калибровочный синусоидальный сигнал частотой 357 МГц генерируется в отдельном блоке калибратора с помощью PLL генератора на основе частоты обращения  $F_0$ . Один калибратор имеет 10 выходов калибровочного сигнала 357 МГц, то есть, может обслуживать до 10 блоков BPM Processor. Калибровочный сигнал поступает в Junction box, расположенный около пикапа, в котором через расщепитель сигналов 1:4 и направленные ответвители поступает на 4 входа пикап-станции. Инжектор СКИФа работает с частотой 1 Гц.

Пучок присутствует во всех пикапах Инжектора только часть цикла инъекции в 1 сек: в Бустере – около 400 мс, в Линаке и каналах – не более 0.5 мс. Калибровочный сигнал измеряется в течение интервала времени  $T_{CAL}$ , когда пучка нет.

Основой цифровой части блока является системный модуль (SoM) Mercury+ME-SA2-D6-7I-D11H от фирмы Enclustra. Он представляет собой плату размером 74×54 мм, вставляемую в цифровую плату блока электроники пикапов через ВЧ разъемы FX10A-168P-SV. Данный модуль содержит FPGA Cyclon-5 5CSTFD6D5F31I7N с встроенным процессором, оперативную память DDR3 емкостью 2 Гб, гигабитные приемопередатчики и 3 Ethernet порта – 2 порта 100 Мбит/сек и один порт 1 Гбит/сек. Такие ресурсы позволяют реализовать в блоке электроники полноценную ОС Linux. Для связи с другими устройствами в блоке имеются 4 гигабитных оптических приемопередатчика (трансивера).

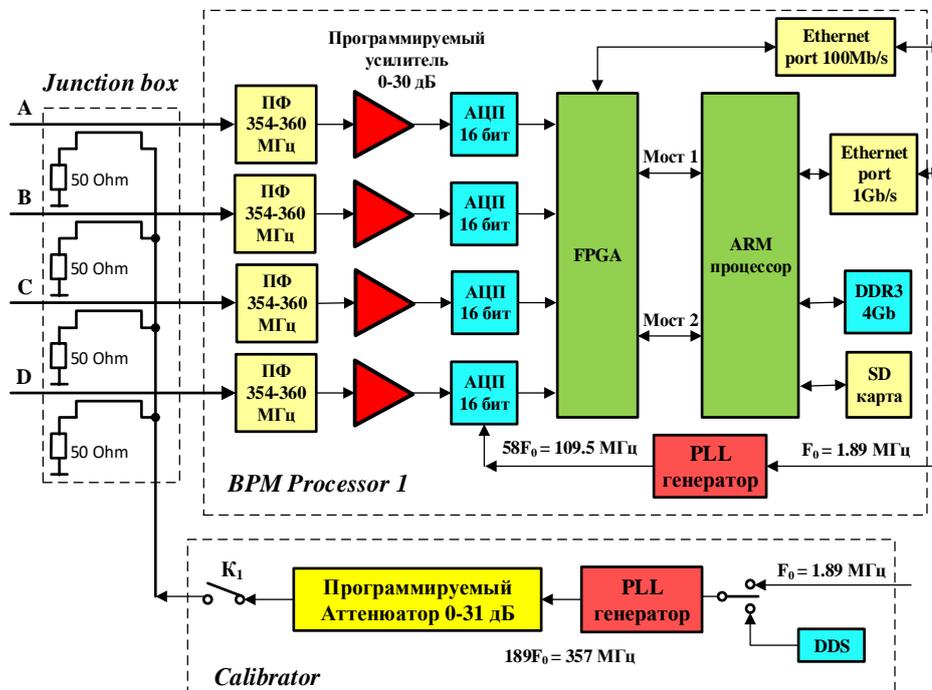


Рисунок 3.7.1.2. Блок-схема блока электроники для работы с одним пикапом.



Рисунок 3.7.1.3. Блок электроники BPM Processor для работы с одним пикапом.

Принцип работы электроники основан на использовании калибровочного сигнала с частотой, равной частоте самого сигнала, который в свою очередь равен частоте ВЧ Бустера 357 МГц ( $189F_0$ ). Калибровочный синусоидальный сигнал частотой 357 МГц генерируется в отдельном блоке калибратора с помощью PLL генератора на основе частоты обращения  $F_0$ . Один калибратор имеет 10 выходов калибровочного сигнала 357 МГц, то есть, может

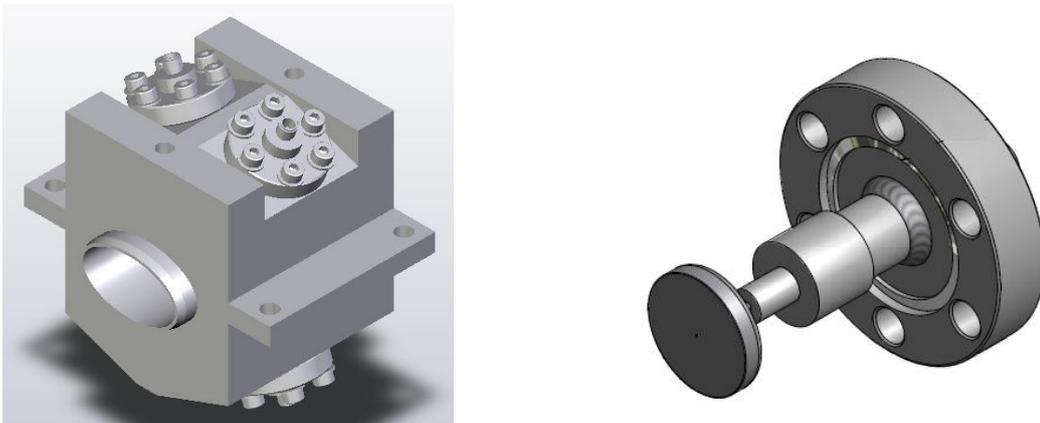
обслуживать до 10 блоков BPM Processor. Калибровочный сигнал поступает в Junction box, расположенный около пикапа, в котором через расщепитель сигналов 1:4 и направленные ответвители поступает на 4 входа пикап-станции. Инжектор СКИФа работает с частотой 1 Гц. Пучок присутствует во всех пикапах Инжектора только часть цикла инжекции в 1 сек: в Бустере – около 400 мс, в Линаке и каналах – не более 0.5 мс. Калибровочный сигнал измеряется в течение интервала времени  $T_{CAL}$ , когда пучка нет.

Основой цифровой части блока является системный модуль (SoM) Mercury+ME-SA2-D6-7I-D11H от фирмы Enclustra. Он представляет собой плату размером 74×54 мм, вставляемую в цифровую плату блока электроники пикапов через ВЧ разъемы FX10A-168P-SV. Данный модуль содержит FPGA Cyclon-5 5CSTFD6D5F31I7N с встроенным процессором, оперативную память DDR3 емкостью 2 Гб, гигабитные приемопередатчики и 3 Ethernet порта – 2 порта 100 Мбит/сек и один порт 1 Гбит/сек. Такие ресурсы позволяют реализовать в блоке электроники полноценную ОС Linux. Для связи с другими устройствами в блоке имеются 4 гигабитных оптических приемопередатчика (трансивера).

Блок электроники BPM Processor для одного пикапа представляет собой модуль евромеханики высотой 1U, включаемый в сеть питания 220 В. Модуль подсоединяется к сети Ethernet 1 Гбит/сек, через которую осуществляется управление модулем и читаются результаты измерений. В одной стойке будет размещена электроника для 7-10 пикапов. В каждой стойке будет находиться блок распределения синхросигналов, который будет в оптическом виде получать синхросигналы (импульс «нулевой» сепаратрисы, частота обращения, разрешение впуска) и в электрическом виде выдавать эти синхросигналы в каждый блок электроники пикапов.

Измерение орбиты пучка в бустере будет осуществляться с помощью электростатических датчиков положения пучка (пикапов). Для обеспечения качественной коррекции орбиты пучка обычно рекомендуется использовать как минимум 4 пикапа на 1 период бетатронных колебаний. Исходя из этого, в каждом из 4-х квадрантов будет установлено 9 пикапов. Еще один пикап будет установлен после выпускного магнита. Таким образом, общее количество пикапов в бустере предполагается 37 шт.

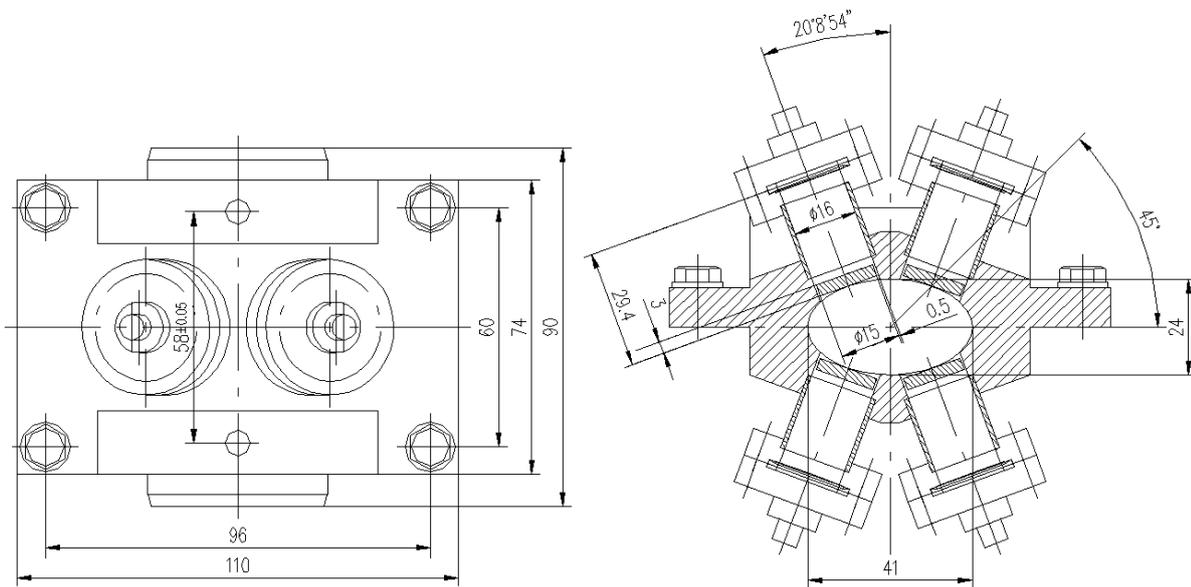
Для бустера предлагается конструкция пикапа, ранее разработанная в ИЯФ для бустера источника СИ NSLS-II (BNL, USA) (**Рисунок 3.7.1.4**).



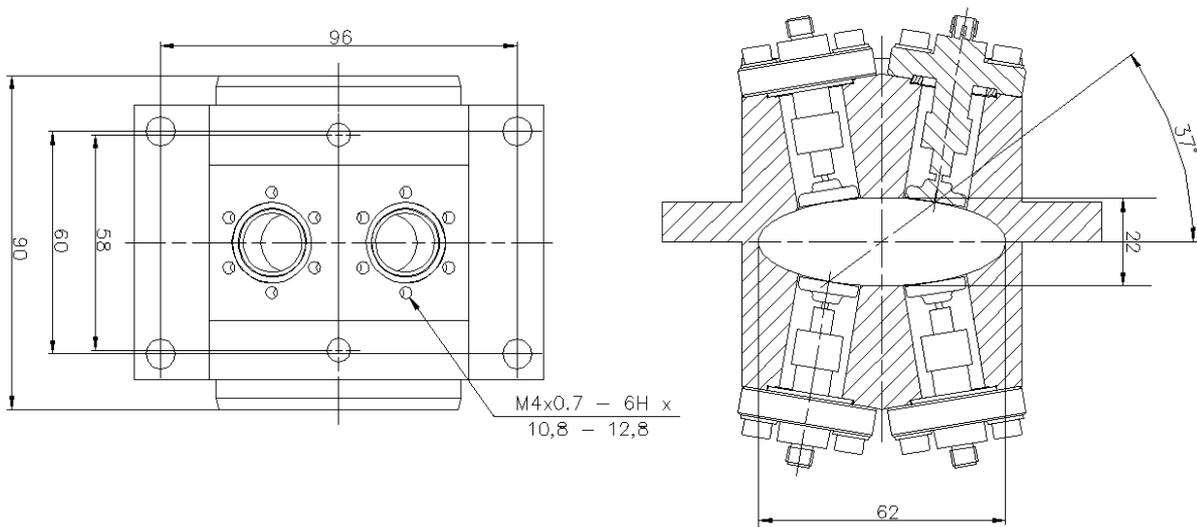
**Рисунок 3.7.1.4.** Пикап для бустера: слева – пикап в сборке, справа – вакуумный ввод.

Электроды пикапа диаметром 15 мм привариваются прямо к вакуумному вводу, оканчивающегося разъемом типа SMA. В пикапах используются вакуумные вводы с уже готовыми фланцами, которые затем прикручиваются к корпусу пикапа. Волновое сопротивление каждого ввода 50 Ом.

В зависимости от места установки пикапы будут 2-х типоразмеров. В арках и после выпускного магнита будут установлены пикапы эллиптического сечения 41×24 мм с электродами, расположенными под углом 45° к горизонтальной плоскости. Всего таких пикапов будет 29 – по 7 шт. в каждой арке и один после выпускного магнита. В прямолинейных промежутках будут установлены пикапы эллиптического сечения 62×22 мм с электродами, расположенными под углом 37° к горизонтальной плоскости. Всего таких пикапов будет 8 – по 2 шт. в каждом промежутке. На **Рисунках 3.7.1.5** и **3.7.1.6** приведены эскизы пикапов бустера.



**Рисунок 3.7.1.5.** Пикап первого типа для установки в дугах и на выпуске.



**Рисунок 3.7.1.6.** Пикап второго типа для установки в прямолинейных промежутках.

Пикапы должны работать при сверхвысоком вакууме ( $<10^{-10}$  Торр) и выдерживать нагрев до 150 °С без повреждения. Поскольку пикапы обладают значительной нелинейностью (нелинейностью зависимости напряжений сигналов на электродах от смещения пучка), предполагается их линеаризация. Для этого на специальном автоматизированном измерительном стенде для каждого пикапа снимается координатная сетка (на основе измерений сигналов с электродов для каждого положения калибровочного стержня), на основе которой вычисляются коэффициенты полинома для расчета координат пучка.

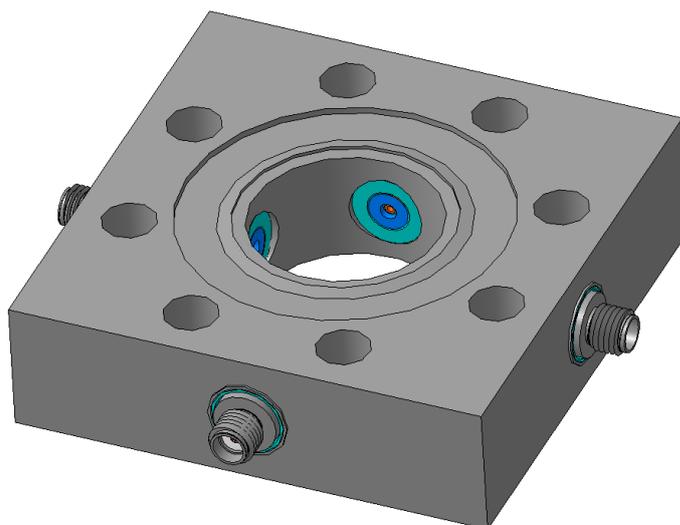
Электроника пикапов в бустере должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать пооборотные измерения положения пучка для всего времени циклов накопления и подъема энергии с разрешением лучше 30 мкм (при токе более 1 мА);
- обеспечивать измерения орбиты пучка с частотой  $\sim 10$  кГц с относительной точностью лучше 10 мкм (при токе более 1 мА);
- обеспечивать измерения первого оборота при инжекции в Бустер.

Электроника пикапов бустера аналогична используемой для линака и каналов.

После перепуска пучка из бустера в накопитель СКИФ из блока BPM Processor прочитывается массив координат пучка, охватывающий по времени все фазы цикла работы бустера. Дискретность по времени этого массива составляет  $\sim 100$  мс. Кроме того, по окончании каждого цикла работы бустера мы будем иметь измеренное положение пучка за каждый оборот – от инжекции до выпуска. Ожидаемая относительная точность измерений положения пучка при времени одного измерения  $\sim 100$  мс лучше 2 мкм при токе пучка более 5 мА.

Пикапы соединяются со стойкой электроники кабелями типа LMR-240 и LMR-400. Длины этих кабелей для некоторых пикапов могут достигать 100 м. Кабель типа LMR-400 с затуханием около 8 дБ/100м для частоты 357 МГц будет использован для кабелей длиной более 50 м. Кабель типа LMR-240 с затуханием около 16 дБ/100м для частоты 357 МГц будет использован для кабелей длиной менее 50 м. Учитывая возможные помехи от высоковольтных импульсных источников питания при инжекции в бустер и выпуске из него, кабели от пикапов должны быть проложены в отдельных металлических лотках. Сами лотки должны быть на достаточном расстоянии от силовых кабелей, идущих от этих источников питания.



**Рисунок 3.7.1.7.** Пикап для основного накопителя.

Для измерения орбиты пучка в основном накопителе будут установлены 244 электростатических датчика положения пучка (пикапа). Критическим для конструкции пикапа является нагрев его электродов пучком, который зависит от диаметра электродов нелинейно. Оптимизация и моделирование процесса нагрева при максимальном токе 400 мА привели к выбору диаметра электрода 6 мм. Предварительная конструкция пикапа для основного кольца показана на **Рисунке 3.7.1.7**.

Длина пикапа вдоль орбиты 20 мм, апертура 28 мм, диаметр электродов 6 мм. Зазор между электродом и корпусом около 0.3 мм. Такой маленький зазор дает дополнительное ослабление высших мод, наводимых пучком, и, соответственно, уменьшает нагрев. Вакуумные вводы типа SMA привариваются к корпусу. Волновое сопротивление 50 Ом. Полоса пропускания вакуумных вводов должна быть более 2 ГГц, для того, чтобы мощность высших мод проходила через разъем и далее поглощалась в кабеле и на входе блока электроники, а не поглощалась в электродах.

Учитывая предельно малый эмиттанс пучка в накопителе, особые требования накладываются на точность измерений положения пучка. Считается, что относительная погрешность измерений положения пучка должна быть  $\leq 10\%$  размеров пучка. В **Таблице 3.7.1.2** приведены требования к основным параметрам электроники пикапов, характеризующим относительную точность измерений.

**Таблица 3.7.1.2.** Требования к пикапам накопителя (ток 100-400 мА).

Разрешение при времени измерения 100 мс	$\leq 200$ нм
Разрешение при времени измерения 10 мс	$\leq 50$ нм
Разрешение пооборотных измерений	$\leq 1$ мкм
Долговременная нестабильность измерений	$\leq 200$ нм
Зависимость координат пучка $X_i$ , $Y_i$ от тока пучка	$\leq 500$ нм
Зависимость $X_i$ , $Y_i$ от заряда в сгустках	$\leq 500$ нм

В качестве пикапной электроники будет использована электроника Libera Brilliance+ фирмы Instrumentation Technologies. Основным режимом работы пикапной электроники накопителя являются непрерывные измерения с частотой  $\sim 10$  кГц, данные используются для быстрой (в полосе до 400 Гц) стабилизации орбиты (FOFB). Накопленные за  $\sim 100$  мс результаты измерений передаются в систему управления основного Синхротрона для вывода на монитор и для записи в базу данных. При необходимости можно запросить результаты пооборотных измерений.

Вся пикапная электроника накопителя размещается в 16 термостабилизируемых стойках, по одной стойке на каждый сектор. В каждой стойке будут находиться 4 крейта электроники Libera Brilliance+ для 14 пикапов. Синхросигналы будут подаваться в оптическом виде на вход модулей “Timing module”, находящихся в крейтах (по одному модулю в каждом крейте).

Для быстрой стабилизации орбиты пучка крейты Libera Brilliance+ соединяются оптическими кабелями в кольцо с помощью GDX-модулей, расположенных в крейтах (по одному модулю в каждом крейте). Каждые 100  $\mu$ с GDX-модули обмениваются друг с другом результатами измерений координат  $X_i$ ,  $Y_i$  по всем пикапам. В результате каждый GDX-модуль будет иметь измеренные координаты  $X_i$ ,  $Y_i$  от всех пикапов и на их основе вычислять поправки в токи корректоров, которыми они управляют, и затем в оптическом виде передавать новые значения токов корректоров в источники питания быстрых корректоров.

Измерения среднего тока пучка в бустере и накопителе будут осуществляться с помощью трансформаторов постоянного тока DCCT производства фирмы Bergoz Instrumentation. Мы выбрали модели с фланцами готовые к соединению с вакуумной камерой. Данные трансформаторы могут работать в сверхвысоком вакууме и не требуют развязки сильфонами. Они поставляются вместе с аналоговой электроникой. По точности измерений выбраны модели с высоким разрешением High resolution model. DCCT с аналоговой электроникой показаны на **Рисунке 3.7.1.8**.



**Рисунок 3.7.1.8.** Трансформатор постоянного тока DCCT и его электроника.

К аналоговому выходу будет подключен 20-разрядный АЦП для преобразования выходного напряжения в цифровой вид, из которого измеренный ток передается в систему управления.

Для бустера нами выбрана модель NPCT-CF4"1/2-60.4-120-UHV с внутренним диаметром фланца 60.4 мм. Для основного синхротрона нами выбрана модель NPCT-CF2"3/4-34.9-120-UHV с внутренним диаметром фланца 34.9 мм. Длина датчиков 120 мм. Электрические параметры у обеих моделей одинаковы и представлены в **Таблице 3.7.1.3**.

Для определения абсолютного заряда ступки в линаке и каналах перепуска, а также, для измерения распределения заряда по сепаратрисам в бустере и накопителе используются быстрые датчики тока FCT. Количество быстрых датчиков тока в различных установках комплекса СКИФ представлено в **Таблице 3.7.1.4**.

**Таблица 3.7.1.3.** Основные параметры DCCT от фирмы Bergoz Instrumentation.

Диапазон тока пучка	$\pm 20$ мА, $\pm 200$ мА, $\pm 2$ А, $\pm 20$ А
Управление диапазоном	2 штыря разъема DB-9 на задней панели, уровни TTL
Выходное напряжение	$\pm 10$ В
Рабочая полоса (-3дБ)	10 кГц
Время нарастания	менее 50 мкс до уровня 90%
Разрешение	$< 1$ мкА/Гц <sup>1/2</sup>
Выходная точность	$\pm 0.1\%$ $\pm$ смещение $0 \pm$ чувст. маг. поля $\pm$ темпер. уход
Нелинейность	$< 0.1\%$
Температурный дрейф	$< 0.5$ мкА/°С
Рабочая температура	-40...+80°С
Выходное сопротивление	100 Ом
Выходной ток	10 мА максимум
Выходные разъемы	BNC на передней и задней панели

**Таблица 3.7.1.4.** Количество быстрых датчиков тока в различных установках.

Линак	3
Канал линак-бустер	2
Канал бустер-накопитель	2
Бустер	1
Основной накопитель	1

Нами выбраны быстрые трансформаторы тока FCT производства фирмы Bergoz Instrumentation с фланцами, готовые к монтажу в вакуумную камеру (**Рисунок 3.7.1.9**). Данные трансформаторы могут работать в сверхвысоком вакууме и не требуют развязки сильфонами. Для бустера выбрана модель FCT-CF6"-60.4-40-20:1-UHV с внутренним диаметром фланца 60.4 мм, для канала бустер-накопитель выбрана модель FCT-CF3"3/8-22.2-40-20:1-UHV с внутренним диаметром фланца 22.2 мм, для всех остальных установок выбрана модель FCT-CF4"1/2-34.9-40-20:1-UHV с внутренним диаметром фланца 34.9 мм. Длина всех моделей 40 мм.

Основные параметры всех выбранных моделей FCT приведены в **Таблице 3.7.1.5**.

Для преобразования выходного сигнала FCT в цифровой вид нами выбран быстрый цифровой регистратор сигналов (АЦП) DN2.222-02 производства фирмы Spectrum Instrumentation (**Рисунок 3.7.1.9**). Основные параметры данного модуля приведены в **Таблице 3.7.1.6**.



**Рисунок 3.7.1.9.** Быстрый трансформатор тока FCT от Bergoz Instrumentation (слева). Быстрый АЦП DN2.222-02 от фирмы Spectrum Instrumentation (справа).

**Таблица 3.7.1.5.** Основные параметры выбранных моделей FCT.

Полоса частот	1.5 ГГц
Коэффициент трансформации	1:20
Чувствительность	1.25 В/А
Время нарастания выходного сигнала	0.23 нс
Максимальный импульсный ток	400 А (импульс 1 нс)

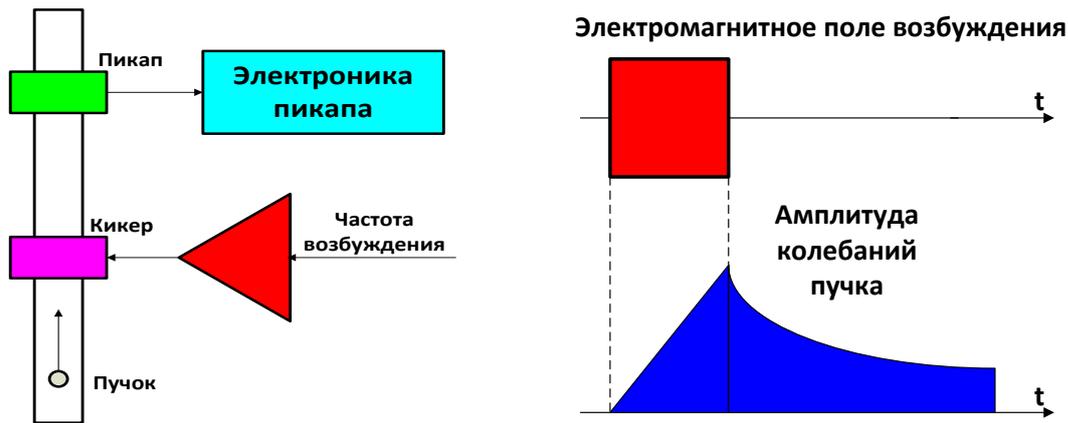
**Таблица 3.7.1.6.** Основные параметры АЦП DN2.222-02.

Аналоговая полоса	1.5 ГГц
Частота оцифровки	2.5 ГГц
Разрядность	8 бит
Внешняя синхронизация	есть
Количество амплитудных диапазонов	4
Амплитудные диапазоны	от $\pm 200$ мВ до $\pm 2.5$ В

Блок имеет Ethernet порт 1 ГГбит/с, через который он подключается к локальной сети комплекса СКИФ. Оцифрованные массивы через Ethernet передаются в систему управления и далее отображаются на мониторах. Для вычисления заряда пучка в линаке и каналах в процессе обработки данных осуществляется интегрирование сигнала. Абсолютная точность

измерения заряда пучка составляет около 5 %, относительная точность (повторяемость) – лучше 1 %.

Система измерения орбиты пучка позволяет измерять бетатронные частоты (их дробные части) во время инжекции с помощью вычисления спектра остаточных колебаний пучка. Однако важно иметь информацию о бетатронных частотах и во время цикла ускорения пучка, особенно в процессе запуска бустера. Для этого будет использована отдельная система измерения бетатронных частот на основе резонансного возбуждения колебаний пучка. Подобная система была разработана и изготовлена для бустера NSLS-II. Принцип работы системы показан на **Рисунке 3.7.1.10**.



**Рисунок 3.7.1.10.** Принцип работы системы: слева – схема системы, справа – временная диаграмма.

Пикап и кикер представляют собой 50-омные согласованные полосковые линии. На кикер подается радиочастотный (РЧ) импульс возбуждения с частотой  $F_{рч}$ , близкой к частоте  $F_B = (1+v_{x,y})F_0$ , где  $F_0$  – частота обращения,  $v_{x,y}$  – дробная часть горизонтальной (вертикальной) бетатронной частоты. Длительность РЧ импульса  $\Delta T_{рч}$  составляет  $(100-500)T_0$ , где  $T_0$  – период обращения пучка. По окончании РЧ импульса пучок совершает затухающие бетатронные колебания, которые регистрируются пикапом. Амплитуда колебаний будет достаточна, если разница частот  $F_{рч}$  и  $F_B$  будет менее  $0.5/\Delta T_{рч}$ . Электроника пикапа по спектру этих колебаний вычисляет дробную часть горизонтальной (или вертикальной) бетатронной частоты и корректирует частоту возбуждения  $F_{рч}$ . Минимальное время одного измерения составляет около 1 мс. Таким образом, мы имеем следящую систему, в которой частота возбуждения пучка следует за измеренной бетатронной частотой. Точность измерений бетатронной частоты составляет порядка  $10^{-4} F_0$ . Количество измерений за время подъема энергии пучка может составлять несколько сотен. Процесс измерения бетатронных частот во время подъема энергии  $T_{п}$  показан на **Рисунке 3.7.1.11**.

Существует два режима работы системы измерения бетатронных частот за время подъема энергии пучка:

- Измерение за время подъема энергии только горизонтальной (либо только вертикальной) бетатронной частоты;
- Измерение за время подъема энергии и горизонтальной и вертикальной бетатронных частот.

В первом режиме возбуждение (короткий удар по пучку) осуществляется только в горизонтальной или только в вертикальной плоскости. Во втором режиме удары по пучку в горизонтальной и в вертикальной плоскости чередуются между собой, то есть, в один элементарный цикл  $\Delta T$  осуществляется удар по пучку в горизонтальной плоскости, в следующий элементарный цикл осуществляется удар по пучку в вертикальной плоскости и т.д. После выпуска пучка блок электроники передает в систему управления бустером либо 1 массив из  $N$  измеренных значений дробной части горизонтальной (вертикальной) бетатронной частоты, либо 2 массива по  $N/2$  измеренных значений дробной части и горизонтальной и вертикальной бетатронных частот.

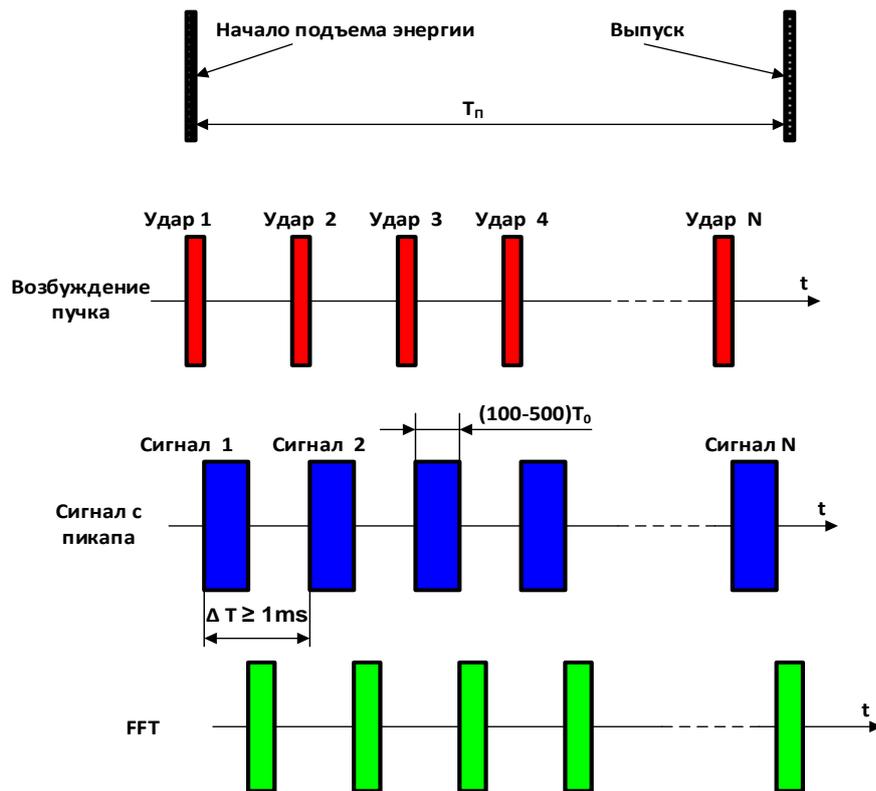


Рисунок 3.7.1.11. Процесс измерения бетатронных частот во время подъема энергии бустера.

Структурная схема системы измерения бетатронных частот в Бустере представлена на **Рисунке 3.7.1.12**. Блок электроники обрабатывает сигналы с пикапа, включая фурье-преобразование и вычисление бетатронных частот, а также формирует РЧ импульсы, которые после усиления усилителями мощности подаются на пластины кикера.

Подавая импульс возбуждения либо на вход усилителя мощности  $X$ , либо на вход усилителя мощности  $Y$ , мы создаем внутри кикера электромагнитное поле, возбуждающее либо горизонтальные бетатронные колебания, либо вертикальные бетатронные колебания.

Пикап и кикер совершенно идентичны и состоят из 4-х электродов в виде пластин, восьми вакуумных вводов и корпуса. Чертеж пикапа (кикера) представлен на **Рисунке 3.7.1.13**. Электроды представляют собой полосковые 50-омные линии, на обоих концах прикрепленные к вакуумным вводам типа SMA. Электроды расположены под углом  $45^\circ$  к горизонтальной

плоскости. Длина электродов  $\sim 210$  мм, что составляет  $\lambda/4$  ( $\lambda$  – длина волны) на частоте 357 МГц. С точки зрения чувствительности пикап с такой длиной электродов будет оптимален на частотах 357 МГц, 714 МГц и т.д. Ожидаемая амплитуда сигнала гармоника 357 МГц на выходе пикапа, нагруженного на 50 Ом, составляет около 300 мВ при общем заряде пучка в бустере 15 нКл. Вакуумные вводы предполагается изготавливать в ИЯФ.

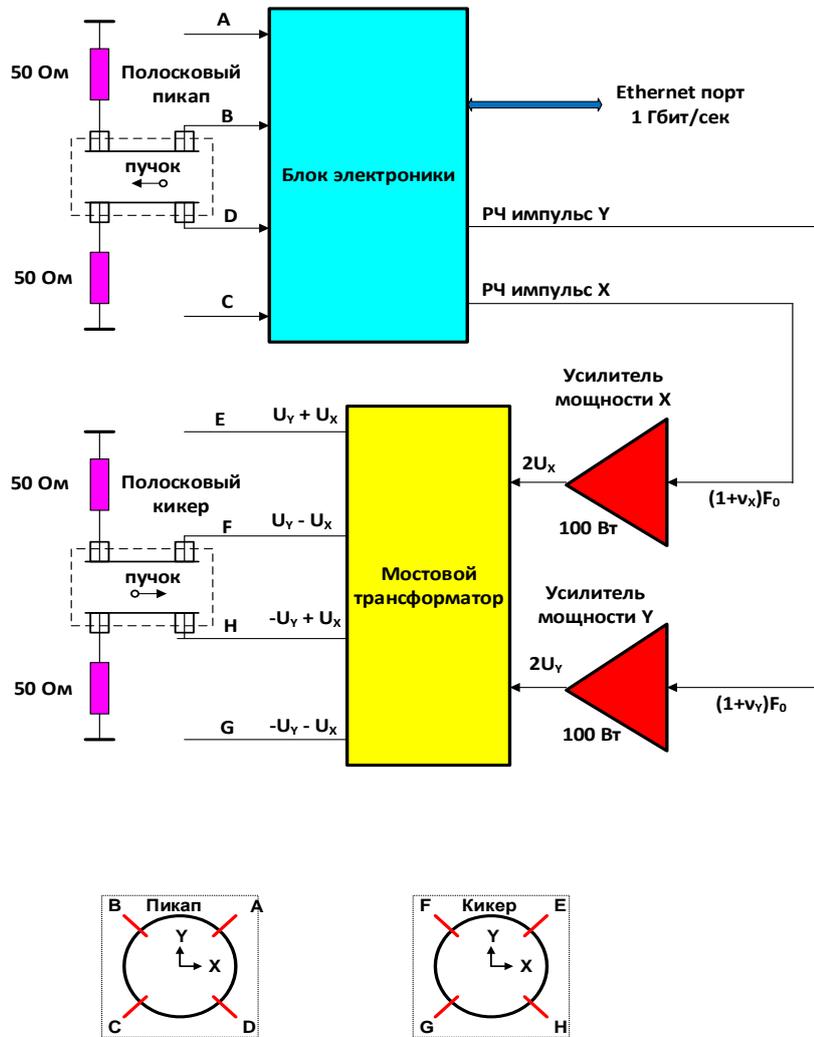
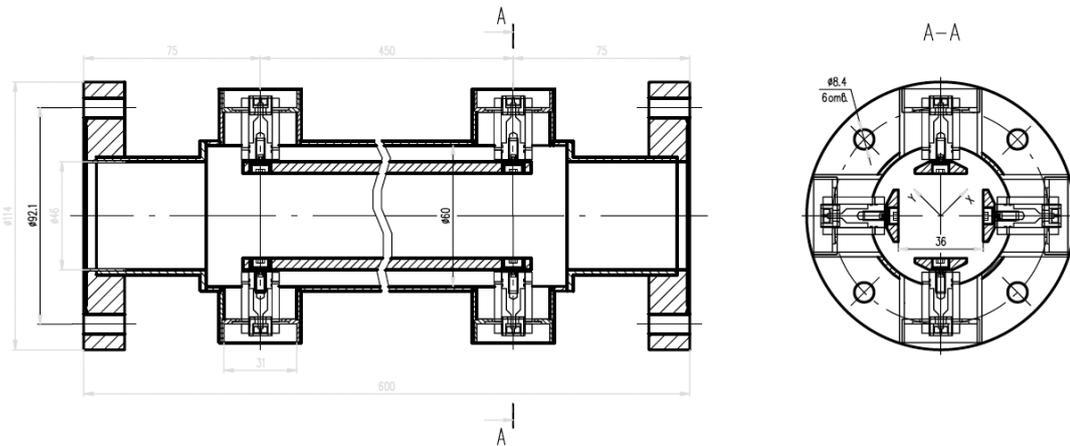


Рисунок 3.7.1.12. Структурная схема системы измерения бетатронных частот в бустере.



**Рисунок 3.7.1.13.** Чертеж пикапа (либо кикера).

В основном накопителе предполагается измерять бетатронные и синхротронную частоты с помощью пикапов системы измерения орбиты пучка. Бетатронные колебания будут возбуждаться либо при инжекции пучка (остаточные колебания), либо с помощью удара по пучку путем подачи короткого импульса (длительностью менее периода обращения  $T_0 \approx 1.59 \mu\text{s}$ ) на специальный кикер. Обработывая полученные массивы пооборотных измерений, можно получить искомые бетатронные и синхротронную частоты, а также измерить бета-функцию. Кикер для измерения бетатронных частот состоит из 2-х пластин, расположенных под углом  $45^\circ$ . После подачи на кикер высоковольтного импульса амплитудой 1-20 кВ одновременно возбуждаются и горизонтальные и вертикальные бетатронные колебания.

### 3.7.2 Оптическая диагностика пучка

Оптическая диагностика пучка (ОДП) бустера СКИФ действует всех этапах работы бустера: при инжекции пучка в бустер из линейного ускорителя, при ускорении пучка в бустере, во время инжекции из бустера в СКИФ. ОДП бустера СКИФ предназначена для измерения поперечных и продольных размеров пучка в бустере с использованием синхротронного излучения из поворотных магнитов. ОДП производит следующие измерения:

- продольного профиля заданного сгустка с относительной точностью  $\leq 5\%$ ;
- поперечных размеров пучка во всех перечисленных режимах работы ускорителя;
- качественный контроль за поведением поперечного профиля пучка

Измерения параметров пучка производятся путем регистрации оптической части спектра синхротронного излучения (СИ), испускаемого пучком в дипольных поворотных магнитах. Свет выходит из вакуумной камеры сквозь высоковакуумное оптическое окно, отразившись от неохлаждаемого медного зеркала.

В бустере предусмотрены две точки для вывода оптической части СИ из вакуумной камеры. Места вывода СИ из вакуумной камеры выбраны в соответствии со следующими соображениями: (1) максимальный вертикальный размер пучка и (2) максимальная свободная длина вакуумной камеры между магнитами.

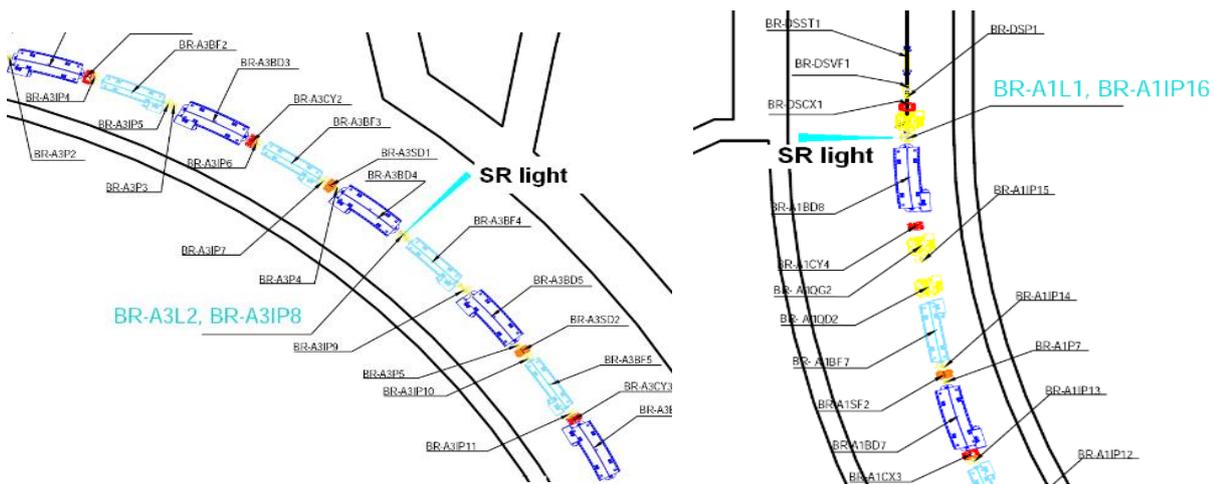
Предложены два порта вывода СИ из дипольных магнитов: первый расположен в третьей арке, второй – вблизи от диагностического прямого промежутка (**Рисунок 3.7.2.1**).

Для упрощения оптической схемы и удобства обслуживания каждое из мест вывода СИ решает свои задачи по измерению параметров пучка. Свет из первого порта предназначен для измерения продольного профиля интенсивности в сгустке при помощи электронно-оптического диссектора. Свет из второго порта вывода СИ предназначен для измерения поперечных размеров пучка и качественного наблюдения за поперечным профилем пучка при помощи телекамеры. Обе диагностических системы находятся внутри тоннеля бустера.

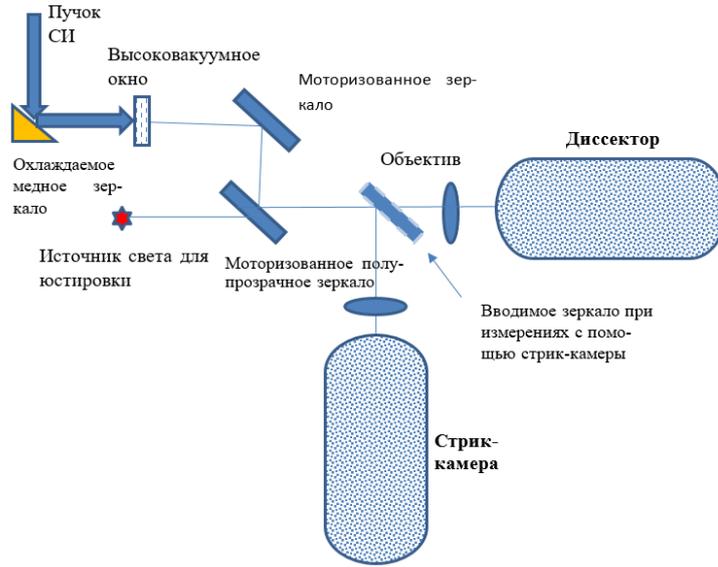
Для измерения продольного профиля сгустка используется электронно-оптический диссектор [25], работающий на высокой гармонике частоты обращения пучка. Оптическая схема диагностики продольного профиля тока показана на **Рисунке 3.7.2.2**. В связи с тем, что вносить существенные изменения в конструкцию вакуумной камеры бустера нежелательно, оптический источник для юстировки диссектора будет размещаться снаружи вакуумного окна.

Угловое и пространственное оптическое разрешение по вертикали и горизонтали, определяемое свойствами синхротронного излучения, позволяет ограничиться использованием проекционной оптики при измерениях поперечного размера пучка. Оптическая схема диагностики приведена на **Рисунке 3.7.2.3**. Для регистрации изображения пучка предлагается использовать CMOS камеру UI-5240SE (Imaging Development Systems, Germany), с матрицей 1280×1024 (1.3 мегапикселя) и гигабитным Ethernet интерфейсом.

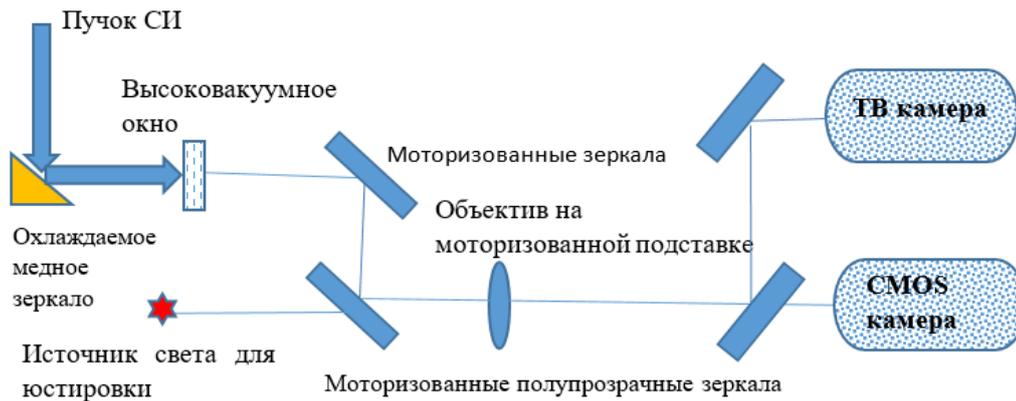
Фокальное расстояние объектива, строящего изображение пучка на камерах, зависит от деталей конструкции, в частности, от возможного расстояния от объектива до точки излучения внутри магнита. Разумно использовать в качестве объектива обычную «склейку» с компенсированной хроматической аберрацией.



**Рисунок 3.7.2.1.** Расположение мест вывода СИ из вакуумной камеры бустера.



**Рисунок 3.7.2.2.** Оптическая схема измерения продольного размера сгустка с помощью электронно-оптического диссектора и стрик-камеры.



**Рисунок 3.7.2.3.** Оптическая схема измерения поперечных размеров пучка.

Размеры матрицы камеры составляют  $6.78 \times 5.43$  мм. Общий вид камеры показан на **Рисунок 3.7.2.4.**



**Рисунок 3.7.2.4.** Внешний вид CMOS камеры UI-5240SE

Для отражения видимой части спектра СИ в обеих системах диагностики используется охлаждаемое водой медное зеркало, размещенное внутри вакуумной камеры. Зеркало снабжено системой ручной юстировки, позволяющей производить его предварительную установку по вертикальному и горизонтальному углу для вывода света из камеры. Отражающая поверхность зеркала напылена алюминием.

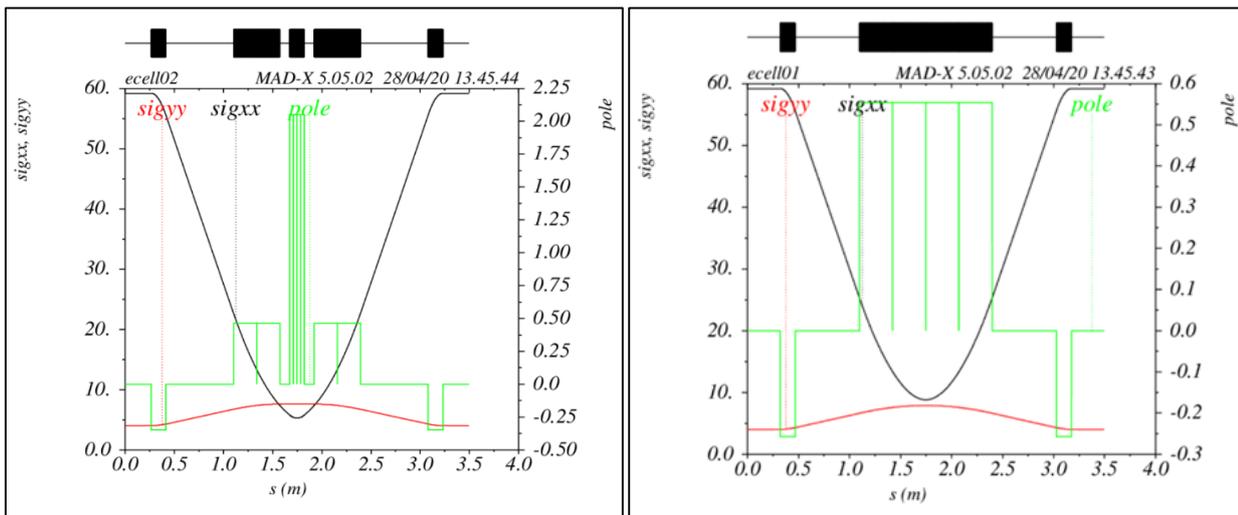
Диагностика продольного профиля сгустка нуждается в следующем обеспечении со стороны системы автоматизации:

- ВЧ сигнал для развертки диссектора;
- Сигнал для запуска сканирования профиля пучка;
- Сигнал для запуска системы выбора сгустка;
- Высоковольтное питание диссектора;
- Высоковольтное питание ВЭУ диссектора;
- Низковольтное питание источника света для юстировки.

Диагностика поперечного профиля пучка нуждается в следующем обеспечении со стороны системы автоматизации:

- Сигнал для запуска цифровой камеры;
- Питание цифровой камеры;
- Питание телевизионной камеры;
- Низковольтное питание источника света для юстировки.
- 1 ГГб канал Ethernet.

В накопителе электронов для нужд оптической диагностики СИ выводится из поворотных магнитов ускорителя с полем 0.55 Т («слабый» магнит) и 2 Т («сильный»). Размеры пучка в точках излучения показаны на **Рисунок 3.7.2.5**.

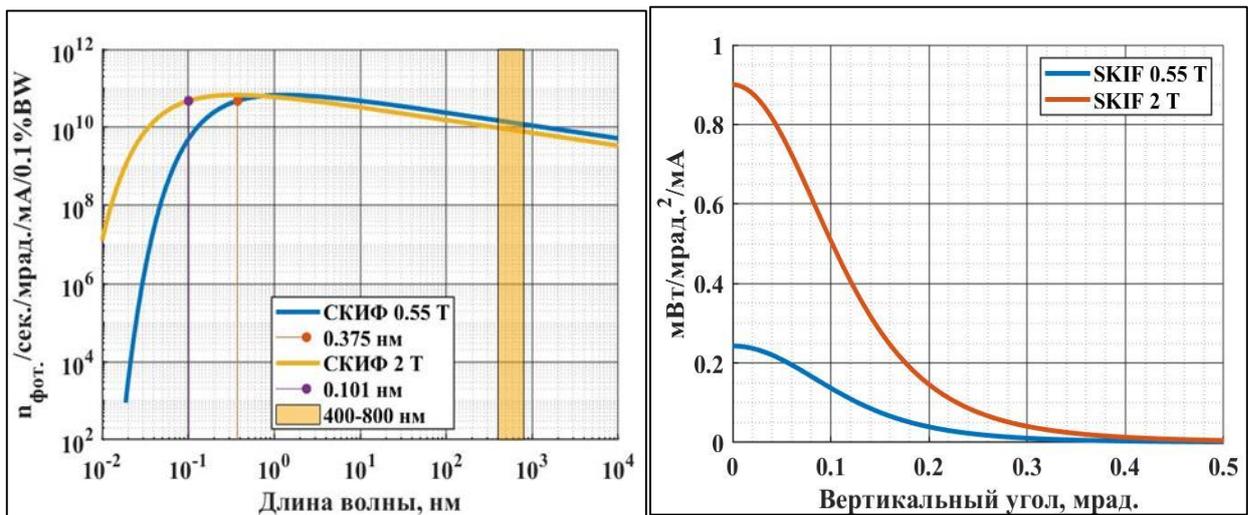


**Рисунок 3.7.2.5.** Состав, структурные функции и размеры пучка в ячейках суперпериода синхротрона.

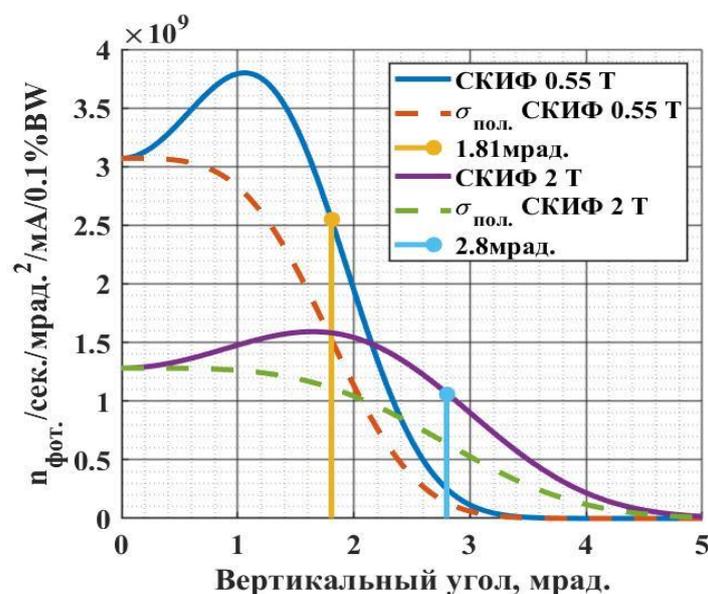
Спектры СИ из «слабого» и «сильного» поворотных магнитов при энергии  $E_b = 3000$  МэВ в радиальной плоскости, показаны на **Рисунке 3.7.2.6** слева, на том же рисунке справа

приведена угловая расходимость полной (спектрально интегрированной) мощности излучения этих же источников в вертикальной плоскости.

Суммарная мощность излучения из «слабого» магнита при токе пучка в 1 мА на энергии 3000 МэВ равна приблизительно 63 мВт/мрад. Для «сильного» магнита эта величина равна 234 мВт/мрад. Большая часть мощности излучения сконцентрирована в узкий конус с среднеквадратичным углом раствора порядка 0.1 мрад. В видимом диапазоне длин волн (400-800 нм) большая часть излучения сосредоточена в конусе с углом раствора 1.8 мрад для «слабого» магнита и 2.8 мрад для «сильного». На **Рисунке 3.7.2.7** приведено угловое распределение плотности потока фотонов на длине волны 450 нм.



**Рисунок 3.7.2.6.** Слева – спектр СИ из дипольных магнитов для энергии 3000 МэВ. Заштрихован диапазон энергий, соответствующий оптической области спектра (400-800 нм). Справа – угловое спектрально интегрированное распределение мощности СИ из поворотных магнитов в вертикальной плоскости.

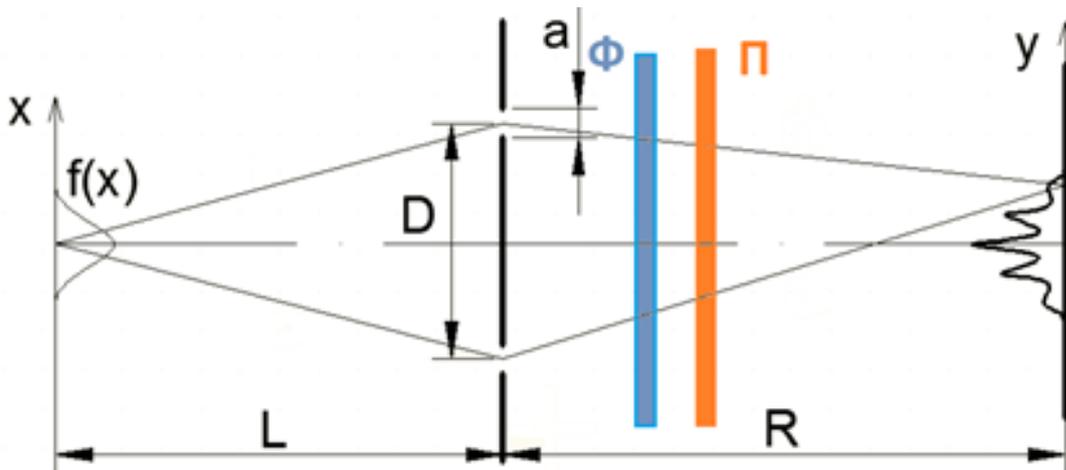


**Рисунок 3.7.2.7.** Угловое распределение плотности потока фотонов из точек излучения (длина волны 450 нм).

Для излучения с длиной волны порядка 1 нм характерный угол направленности СИ около 0.1 мрад. Такое большое различие в расходимости излучения в рентгеновском и видимом диапазоне спектра позволяет использовать канал вывода СИ из «сильного» магнита для диагностики в обоих диапазонах, при этом первое зеркало системы оптического наблюдения можно сделать составным, пропуская рентгеновское излучение через отверстие в центральной части зеркала.

В качестве прообраза станции оптического наблюдения за пучком в накопителе СКИФ предлагается использовать систему оптической диагностики, установленную в 2013 году на источнике СИ «КИСИ-Курчатов» и успешно продемонстрировавшую свои возможности [26-28].

Угловое и пространственное оптическое разрешение по вертикали и горизонтали, определяемое свойствами СИ, не позволяет использовать в СКИФ проекционную оптику, в видимом диапазоне длин волн, при измерениях поперечного размера пучка. Однако в процессе настройки режима работы возможно значительное превышение видимого размера пучка над расчётным, поэтому полезно иметь возможность наблюдать изображение, строящееся средствами проекционной оптики. Для этого предлагается использовать камеру UI-5240SE-M-GL с CMOS матрицей, обладающей хорошим квантовым выходом (от 55%) на длинах волн 400-550 нм, аналогичную используемым в оптической диагностике бустера СКИФ.



**Рисунок 3.7.2.8.** Схема двухлучевого интерферометра. Ф – узкополосный фильтр; П – поляризатор.

В диагностике пучков с характерными поперечными размерами порядка нескольких микрометров широко используются интерферометры с делением волнового фронта [29-30], разумно включить в состав диагностического комплекса два таких устройства для определения радиального и вертикального характерных размеров. Интерферометры используют поляризованный квазимонохроматический свет синхротронного излучения в видимом диапазоне, поток фотонов образует интерферограмму после прохождения двойной щели, фильтрующей и фокусирующей систем (**Рисунок 3.7.2.8**). Определяя видность интерференционной картины можно рассчитать характерный размер источника излучения. Так для пучка с гауссовым распределением заряда среднеквадратичный размер пучка  $\sigma_x$  выражается через модуль степени пространственной когерентности (видность)  $\gamma$ :

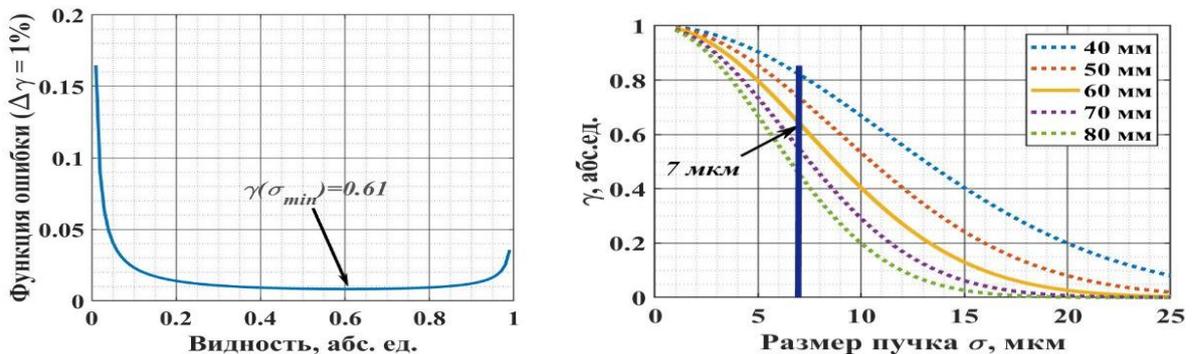
$$\sigma = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{\gamma} \right)},$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения (средняя длина волны узкополосного фильтра);  $L$  – расстояние от источника до щелевой диафрагмы интерферометра;  $D$  – расстояние между щелями. При этом ошибка вычисления  $\sigma$  связана с точностью определения видности следующим выражением:

$$\Delta\sigma = \frac{\lambda L}{\pi D} \frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{8 \cdot \ln \left( \frac{1}{\gamma} \right)}} \cdot \Delta\gamma,$$

где  $\Delta\sigma$  – ошибка вычисления  $\sigma$ ;  $\Delta\gamma$  – неточность определения видности по картине интерференции. График этой функции, нормированный на  $\frac{\lambda L}{\pi D}$  приведён на **Рисунке 3.7.2.9**, там же обозначена точка с  $\gamma(\sigma_{\min})=0.61$  в которой она минимальна. Таким образом для получения лучшей точности измерения размера с помощью интерферометра необходимо обеспечить выполнение равенства:

$$44.2 [\text{нМ}] = \frac{\lambda [\text{нМ}] L [\text{М}]}{D [\text{мм}]}.$$



**Рисунок 3.7.2.9.** Зависимость нормированной ошибки вычисления размера источника излучения от ошибки определения видности.

Таким образом, при использовании полосового фильтра на длине волны 400 нм, и расстоянии от места излучения до диафрагмы интерферометра 7 м, зазор между щелями интерферометра должно составлять  $\approx 63$  мм. Стоит учесть ограничение, накладываемое расходимостью СИ на максимальное расстояние между щелями, которое можно задать выражением:

$$D_{\max}(L) = 2\psi_{RMS} \cdot L,$$

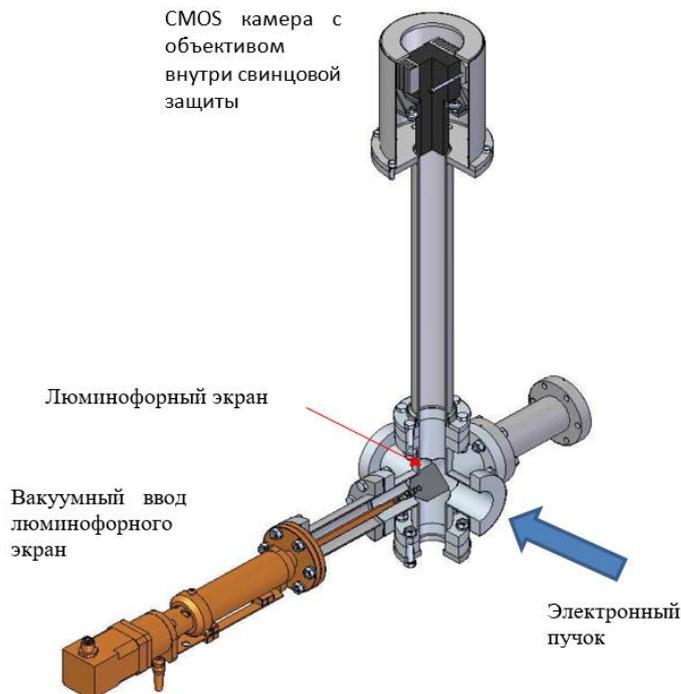
где  $\psi_{RMS}$  – расходимость пучка СИ. Отсюда, приняв расстояние до диафрагмы равным 7 м от места излучения, легко получить  $D_{\max}(7 \text{ м}) \approx 39$  мм и  $D_{\max}(7 \text{ м}) \approx 25$  мм, для «сильного» и «слабого» диполей соответственно. Приведенные значения показывают невозможность применения интерферометра по схеме Юнга в измерениях поперечного вертикального

размера пучка используя излучение видимого диапазона из «слабого» поворотного магнита. Однако расходимости СИ из «сильного» поворотного магнита достаточно, чтобы определять видность получаемой интерферограммы.

Для измерения продольного профиля интенсивности сгустка также используется электронно-оптический диссектор [25], работающий на высокой гармонике частоты обращения пучка. Оптическая схема диагностики продольного профиля сгустков аналогична рассмотренной выше. При этом свет может браться из «слабого» диполя.

### 3.7.3 Люминофоры для измерения параметров пучка

В линаке люминофорные экраны дают информацию о поперечном распределении частиц в пучке при энергиях электронов  $E = 0.6$  МэВ, 3 МэВ, 50 МэВ и 200 МэВ. В связи с тем, что электроны с энергиями 0.6 МэВ тормозятся и испытывают сильное рассеяние в слое вещества с толщиной десятые доли миллиметра, существует необходимость введения люминофорного экрана непосредственно внутрь вакуумной камеры. Поэтому люминофорное покрытие должно быть совместимым с рабочим вакуумом линейного ускорителя. В связи с этим предлагается использование люминофора Р43 либо его аналога, нанесенного методом электрофореза. Внешний вид экрана показан на **Рисунок 3.7.3.1**. Месторасположение экранов в структуре линейного ускорителя определяется энергией пучка.



**Рисунок 3.7.3.1.** Схема люминофорного экрана линейного ускорителя

В бустере шесть люминофорных датчиков (ЛД) предназначены для замыкания первого оборота и восстановления работоспособности бустера в нештатных ситуациях. ЛД используются для получения поперечного профиля пучка в однократном режиме. Изображение пучка, как и в линейном ускорителе, регистрируется объективом и CMOS камерой UI-5240SE. Эта контактная диагностика особенно важна при запуске установки.

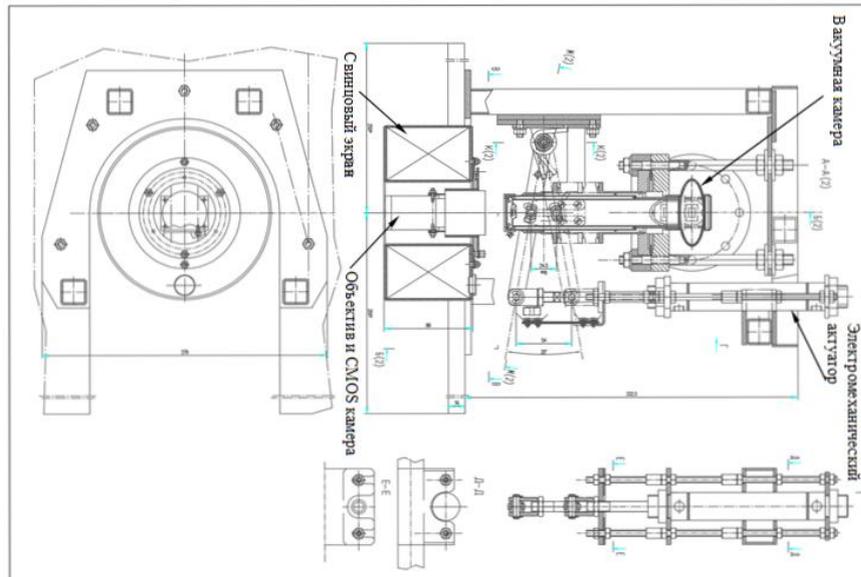
Первый ЛД используется для выбора режима работы магнитов септума и кикера при настройке инъекции в бустер. Второй ЛД позволяет настроить прохождение пучка через первый квадрант. Аналогичная процедура производится с использованием остальных ЛД при замыкании первого оборота пучка в бустере.

Типичное пространственное разрешение экрана ЛД составляет 50 мкм в пределах поля зрения 20 мм. Экран представляет собой подложку из нержавеющей стали толщиной 1 мм, на которую нанесен слой люминофора Р43. Экран находится внутри стакана из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм. Угол рассеяния электронов после прохождения стенки стакана составляет:

$$\theta_s = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.0038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right],$$

где  $p$  – продольный импульс (МэВ/с),  $Z = 1$  для электрона,  $x = 0.5$  мм – толщина стенки стакана, и  $X_0 \approx 0.5$  мм – радиационная длина для нержавеющей стали. Рассеяние в стенке стакана приводит к увеличению регистрируемого размера пучка на величину  $\approx 0.15$  мм при энергии инъекции  $E_{inj} = 200$  МэВ. Это заметно меньше, чем расчетные поперечные размеры пучка и незначительно искажает данные диагностики. Связанное с рассеянием в стенке увеличение регистрируемых размеров полностью пренебрежимо при энергии пучка на выходе из бустера  $E_{ext} = 3$  ГэВ.

Схема конструкции датчика показана на **Рисунке 3.7.3.2**. Люминофорный экран помещен внутри цилиндрического объема, вместе с которым вводится и выводится из вакуумной камеры.



**Рисунок 3.7.3.2.** Конструкция люминофорного датчика.

CMOS камера расположена вне медианной плоскости бустера и защищена свинцовым экраном. Экран имеет две фиксированных рабочих позиции, снабженных концевыми

датчиками положения для контроля за статусом ЛД. Крышка цилиндра, при его выводе из вакуумной камеры ускорителя, служит wake-field экраном. Настройка CMOS камеры и объектива на фокус производится при снятой свинцовой защите. Любая деталь датчика может быть заменена без нарушения вакуума ускорителя.

Для построения изображения люминофорного экрана на сенсоре CMOS камеры используется объектив Tamron M118FM25. Для перемещения люминофорного экрана используется электромеханический актуатор САНВ-10.

Стрик-камера предназначена для разовых измерений продольного профиля заданного сгустка в ускорителе. Стрик-камера вводится, при необходимости, в состав оптической диагностики пучка для регистрации вспышки синхротронного излучения в видимом диапазоне в месте установки электронно-оптического диссектора, т.е. возле магнита BR-A3BD4. Свет отводится на стрик-камеру с помощью вводимого зеркала, при этом возможность измерения продольного профиля с помощью электронно-оптического диссектора может сохраняться. Предполагается, что стрик-камера будет использоваться для специально организованных экспериментов с пучком и будет размещаться в защищенном зале бустера на непродолжительное время. Параметры и внешний вид стрик-камеры PS-1/S1 приведены ниже (**Рисунок 3.7.3.3**).

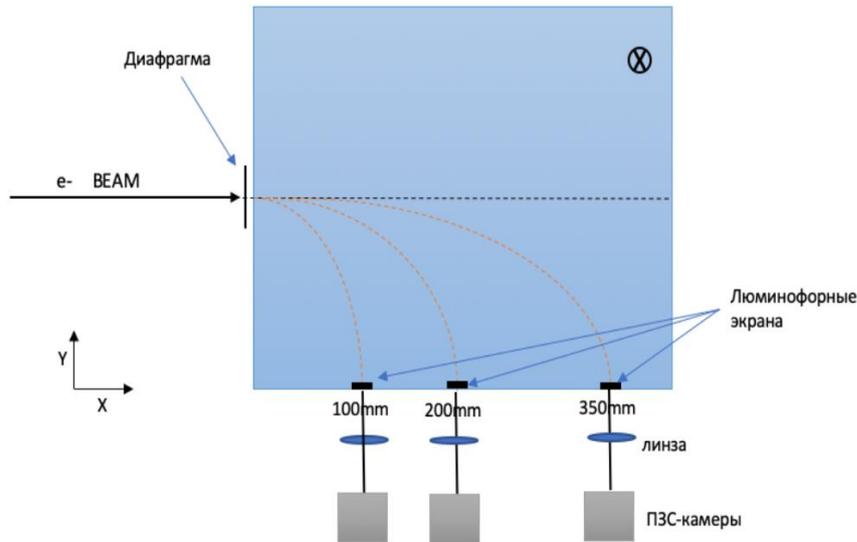


**Рисунок 3.7.3.3.** Внешний вид стрик-камеры PS-1/S1.

При диаметре выходного экрана ЭОП 25 мм имеется три диапазона длительностей развертки стрик-камеры 0.25, 0.75 и 1.5 нс/экран, соответствующие скоростям развертки 10, 30 и 60 пс/мм. Временная нелинейность развертки  $\leq 5\%$ . Динамическое пространственное разрешение вдоль направления щели для всех трех диапазонов развертки (с усилителем яркости)  $\geq 10$  пар лин/мм. Задержка срабатывания ЭОК на развертках 0.25 и 0.75 нс/экран  $\leq 15$  нс, а на развертке 1.5 нс/экран  $\leq 25$  нс. Нестабильность срабатывания (jitter) не более 30 пс ( $\pm 15$  пс). Стрик-камера не является постоянным элементом диагностики какой-либо составляющей комплекса СКИФ, а используется по всему комплексу для измерений световых процессов суб-наносекундной длительности.

Для измерения полного заряда пучка в конце линейного ускорителя предполагается использовать цилиндр Фарадея, обеспечивающий измерение заряда частиц  $0.3 \div 1$  нКл с энергией до 200 МэВ с точностью  $\leq 5\%$ .

Для измерения энергии и энергетического разброса пучка будет использован магнитный спектрометр. Пучок, отклоненный в поперечном магнитном поле, будет регистрироваться с помощью люминофорного экрана и цифровой камеры. Схема спектрометра показана на **Рисунке 3.7.3.4**.



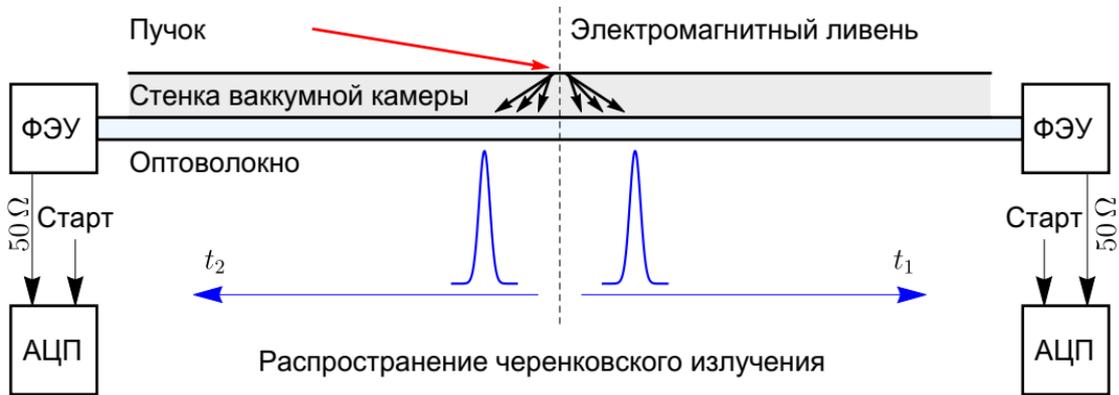
**Рисунок 3.7.3.4.** Схема магнитного спектрометра для измерения энергии и энергетического разброса пучка.

Согласно данным моделирования с помощью кода ASTRA, спектрометр рассчитан на измерение энергии пучка  $E$  в диапазоне от 0.6 МэВ до 200 МэВ с точностью около 1% и измерение энергетического разброса пучка от  $\pm 100$  кэВ ( $E = 0.6$  МэВ) до  $\pm 5$  МэВ ( $E = 200$  МэВ) с точностью 2-3 %.

Для регистрации потерь электронного пучка источника синхротронного излучения СКИФ предполагается использовать распределенный датчик потерь пучка на основе излучения Вавилова-Черенкова в оптоволокне. Датчик может быть использован как в однопролетных каналах транспортировки пучка, так и в кольцевых ускорителях. Условие возникновения черенковского излучения накладывает ограничение на использование данного датчика при малых энергиях пучка. Минимальная энергия пучка, при которой распределенный датчик может регистрировать потери, составляет 5 МэВ. Таким образом, в линейном ускорителе данный датчик может быть использован, на участках, где энергия пучка больше 5 МэВ.

Принцип работы оптоволоконного датчика потерь пучка основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне релятивистскими заряженными частицами электромагнитного ливня, который образуется при попадании пучка на стенку вакуумной камеры ускорителя. Черенковское излучение распространяется по

оптоволокну и регистрируется с помощью фотодетектора. Сигнал с фотодетектора оцифровывается при помощи АЦП. Время прихода светового импульса дает информацию о месте потери пучка, а его интенсивность – о количестве потерянных частиц. Световой импульс можно регистрировать с обоих торцов оптоволоконка. Схема датчика изображена на **Рисунке 3.7.3.5**. Запуск АЦП осуществляется внешним синхроимпульсом, привязанным к моменту инъекции/выпуска пучка.



**Рисунок 3.7.3.5.** Схема оптоволоконного датчика потерь пучка.

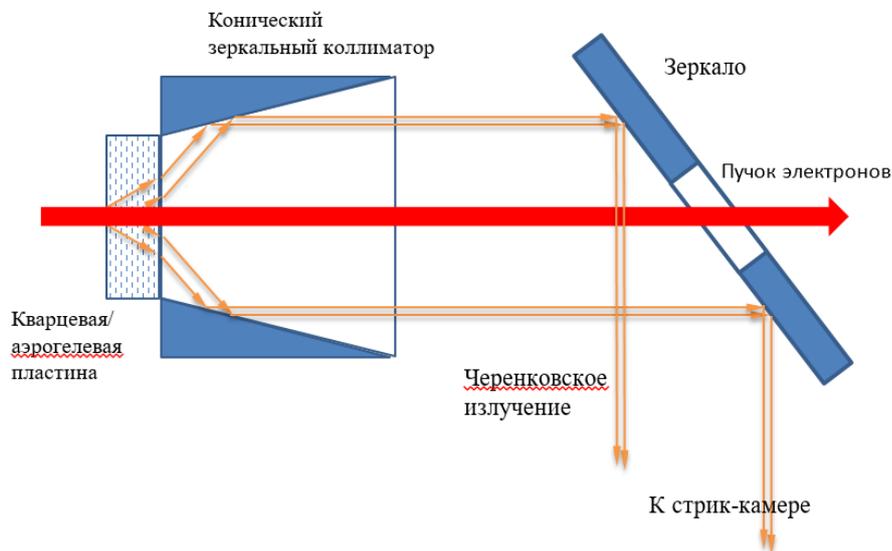
В качестве диагностики потерь пучка в бустере предполагается использовать распределенный датчик потерь пучка на основе излучения Вавилова-Черенкова в оптоволоконке. Принцип его работы аналогичен датчику потерь, который предложено использовать на линаке и в транспортных каналах. У данного датчика отсутствуют шумы, связанные с гамма- и синхротронным излучением.

Во избежание перекрытия потерь пучка с разных оборотов за счет разницы скоростей движения пучка и распространения света по оптоволоконку, первый отрезок оптоволоконка должен располагаться в месте инъекции пучка, при этом максимальная длина отрезка оптоволоконка должна быть не более:  $L \leq P/(n+1)$ , где  $P$  – периметр ускорительного кольца,  $n$  – показатель преломления сердцевины оптоволоконка. Для бустера с периметром 159 м при показателе преломления кварца  $n = 1.46$  максимальная длина отрезка оптоволоконка составляет 65 м, что больше рассчитанной оптимальной длины, которая для кварцевого оптоволоконка равна 40 м. Таким образом, для диагностики полного распределения потерь пучка в бустере, необходимо использовать датчик, состоящий из 4-х отрезков кварцевого оптоволоконка марки «Thorlabs» (FG550UEC) длиной 40 м каждый в паре с ФЭУ на МКП и АЦП с полосой пропускания не менее 200 МГц и частотой дискретизации не менее 500 Мвыб/с.

Для измерения продольного распределения пучка на линейном ускорителе предполагается использование пучкового датчика. Принцип действия данного метода диагностики, заключается в том, что тестирующий низкоэнергетический электронный пучок движущийся перпендикулярно траектории исследуемого сгустка взаимодействует с его электромагнитными полями, в которых получает измеримые углы отклонения. Таким образом зная углы отклонения тестирующего пучка, поперечные размеры исследуемого сгустка, его заряд, а также характер его продольного распределения можно восстановить длину данного сгустка. Наиболее оптимальным местом установки пучкового датчика является промежуток непосредственно после группирователя – предускорителя где пучок имеет релятивистские

энергии. Для случая релятивистских энергий отклонение тестирующего пучка в полях исследуемого сгустка достаточно точно описывается аналитическими выражениями, что позволит более точно верифицировать экспериментальные данные и моделирование. В своем минимальном варианте, пучковый датчик должен обеспечить тонкую настройку фазы группирователя – предускорителя. Изменяя зависимость прицельного параметра тестирующего пучка от амплитуды его отклонения на экране детектора можно подобрать фазу, которая обеспечивает максимальную группировку пучка, при этом будет наблюдаться максимальная амплитуда отклонения тестирующего пучка на детекторе.

Для измерения продольного размера пучка в линейном ускорителе при энергиях, когда применение пучкового датчика не эффективно планируется использовать черенковский датчик, действие которого основано на испускании электронами черенковского света при движении в кварце либо аэрогеле из кварца. Общая концепция датчика представлена на **Рисунке 3.7.3.6**.

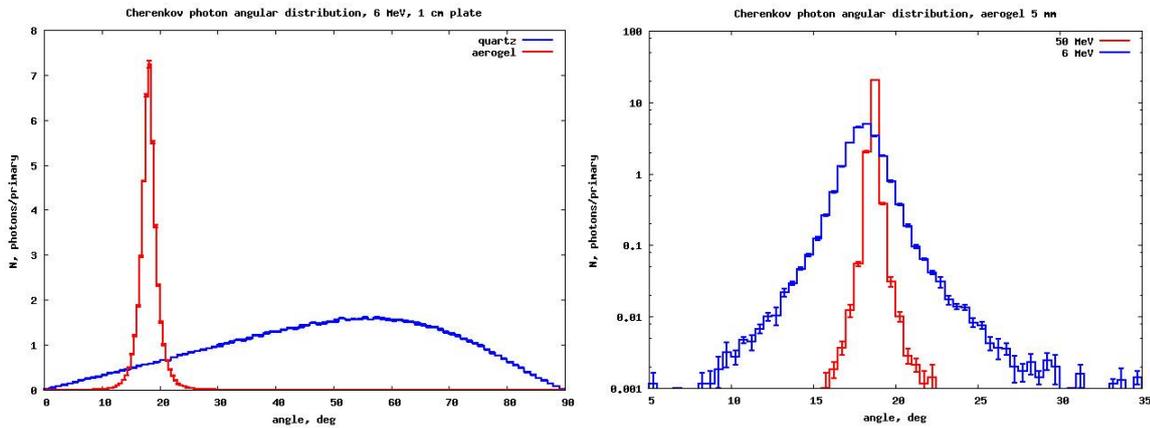


**Рисунок 3.7.3.6.** Схема черенковского датчика для измерения продольного профиля пучка в линейном ускорителе.

Временное разрешение датчика при фокусировке пучка электронов до размера 1 мм и использовании в качестве радиатора аэрогель с коэффициентом преломления 1.05 может достигать 1 пс. Было проведено численное моделирование, позволяющее определить эффективность применения такого датчика с разными радиаторами и для разных энергий пучка линейного ускорителя. В качестве иллюстрации на **Рисунке 3.7.3.7** (слева) приведено сравнение углового распределения черенковских фотонов, испущенных пучком с энергией 6 МэВ при прохождении пластин из аэрогеля и кварца толщиной 1 см и сравнение угловых распределений черенковских фотонов, испущенных электронами с энергиями 6 МэВ и 50 МэВ при прохождении через аэрогель с толщиной 5 мм.

Выходной сигнал будет регистрироваться стрик-камерой. Следует учитывать, что поток фотонов на фотокатоде стрик-камеры уменьшится за счет диафрагмирования электронного пучка и входного телесного угла. Первый фактор приведет к уменьшению

заряда пучка лишь на 30% в случае, если поперечное распределение заряда в пучке описывается функцией Гаусса с  $\sigma = 3$  мм, либо на порядок при однородном поперечном распределении заряда. Второй фактор даст коэффициент около 0.9. В любом случае поток фотонов на входе в стрик-камеру будет по-прежнему достаточным, на уровне  $10^{10}$  частиц, для надежной регистрации продольного профиля пучка линака.



**Рисунок 3.7.3.7.** Слева – угловое распределение черенковских фотонов, испущенных при прохождении электроном с энергией 6 МэВ через аэрогель и кварц толщиной 10 мм. Справа – угловое распределение черенковских фотонов, испущенных электронами с энергиями 6 МэВ и 50 МэВ при прохождении аэрогеля толщиной 5 мм.

### 3.8 Геодезическое обеспечение

Для современных источников СИ с малым эмиттансом соблюдение требований к геометрическим параметрам и стабильности орбиты является одним из основных приоритетов. Задачи геодезического обеспечения создания ЦКП «СКИФ»:

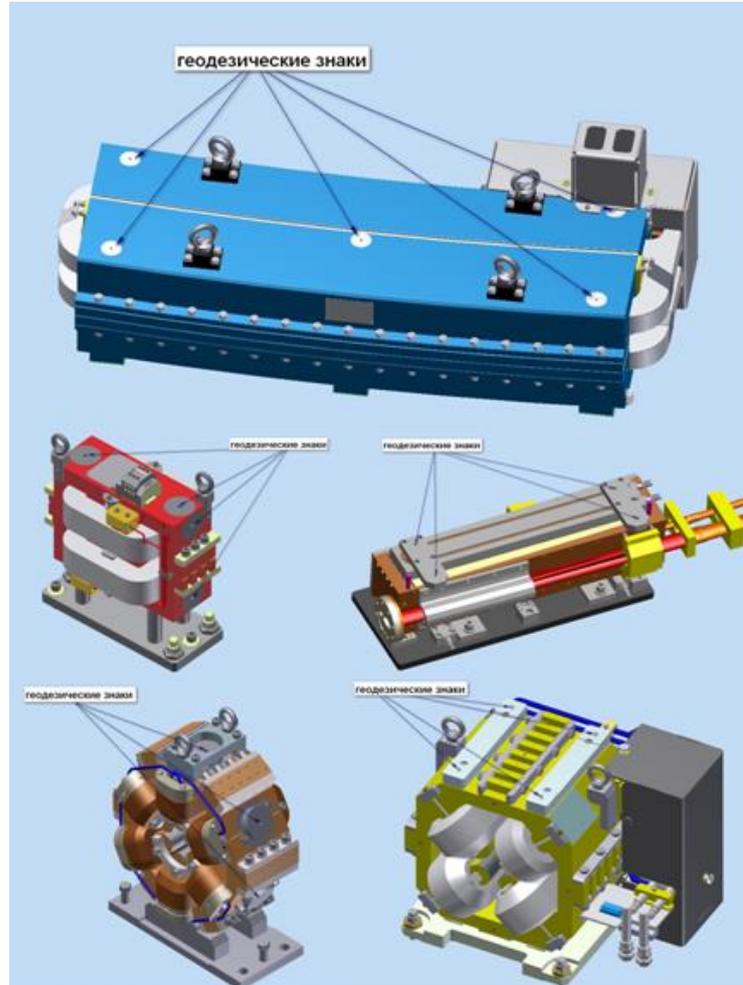
- инструментальный контроль геометрических параметров магнитных элементов, вакуумных камер, других элементов;
- определение взаимного пространственного положения геодезических знаков и магнитной оси элементов, создание каталога проектных координат геодезических знаков и узловых точек орбиты элементов;
- монтаж магнитных элементов и вакуумной системы на гирдерах (точных и стабильных подставках для последовательности элементов ускорителя) с проектными допусками;
- создание опорных геодезических сетей;
- высокоточный монтаж гирдерных модулей в сооружениях комплекса.

Архитектура геодезической системы должна обеспечивать минимизацию издержек, связанных с дополнением и удалением узлов внутри системы, а также, сохранность информации и отдельных объектов системы.

Геодезическая составляющая на стадии проектирования физического оборудования, как правило, ограничивается техническим заданием, определяющим наличие и оптимизацию расположения геодезических знаков (реперных точек, базовых поверхностей) на элементах и опорных модулях (гирдерах). Критериями оптимизации количества и расположения геодезических знаков на элементах являются полнота обзора при различных схемах измерений

с сохранением видимости как минимум на три знака, и распределение знаков на элементах с максимально возможными расстояниями друг относительно друга. Геодезические знаки на элементах бустера (**Рисунок 3.8.1**) представляют собой отверстие диаметром 6.35 мм  $+0.01$  мм глубиной 13 мм.

Для элементов накопителя для повышения точности целесообразно применять геодезические знаки с магнитным держателем отражателя (**Рисунок 3.8.2**).



**Рисунок 3.8.1.** Геодезические знаки на элементах бустера.

Геометрические параметры орбиты заданы физическим проектом. Проектная орбита определяется узловыми точками для каждого элемента это вход, центр и выход (**Рисунок 3.8.3**). Каждая точка помимо трех координат имеет уникальное имя в структуре. Все элементы паспортизируются при проведении совместных магнитных и геодезических измерений, на основании которых создается каталог измеренных координат узловых точек и геодезических знаков в локальной системе координат элемента.

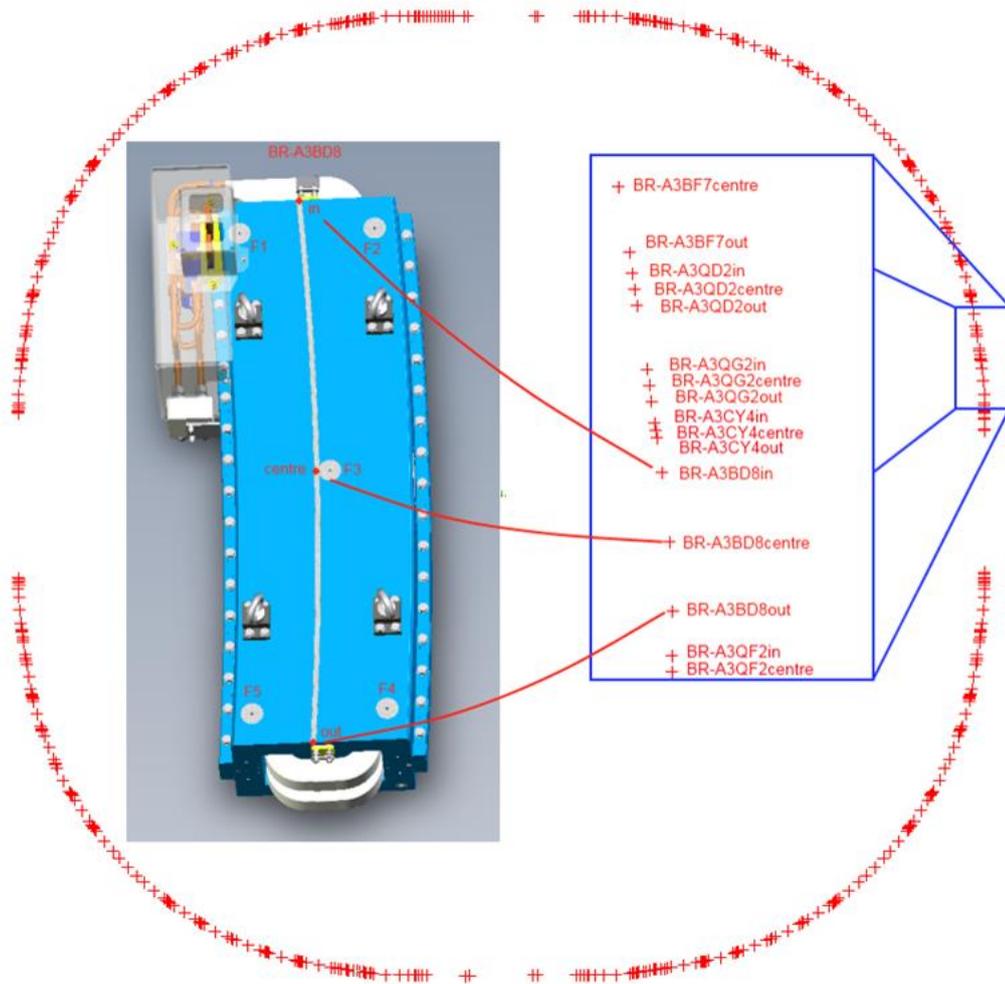


**Рисунок 3.8.2.** Геодезические знаки с магнитным держателем отражателя.

Далее в среде программного обеспечения Spatial Analyzer проводится оптимизация пространственного положения измеренных точек орбиты локального элемента относительно проектных в системе координат физической установки. Полученные после оптимизации координаты геодезических знаков наполняют каталог, используемый при высокоточном монтаже.

Для бустера допуск на позиционирование магнитных осей элементов  $\pm 0.15$  мм. Пространственное положение геодезических знаков относительно магнитной оси элемента для диполя определено с  $\sigma = 0.065$  мм, для квадруполя, секступоля  $\sigma = 0.035$  мм. Положение магнитных элементов относительно проектного по геознакам определено с  $\sigma = 0.085$  мм. Итоговое положение магнитных осей диполей на гирдере относительно проекта с  $\sigma = 0.107$  мм.

Для накопителя требуемая точность позиционирования магнитных осей элементов на гирдере  $\pm 0.03$  мм, а точность позиционирования гирдера относительно соседних гирдеров  $\pm 0.1$  мм. Для накопителя требуется повышение точности определения взаимного положения магнитной оси и геознаков или базовых поверхностей. Это возможно при выполнении магнитных измерений в объеме координатно-измерительной машины. Повышение точности сборки магнитной структуры на гирдерах обеспечивается проведением измерений в термостатированных помещениях.



**Рисунок 3.8.3.** Расположение элементов на проектной орбите бустера.

Геодезическое обеспечение стадий создания комплекса формируется на основе исходных данных и принятых технических решений. Их состав представлен в **Таблице 3.8.1**.

Геодезические опорные сети ускорительных комплексов создаются по принципу нескольких ступеней. Первичная сеть (**Рисунок 3.8.4**) обеспечивает взаимное ориентирование вторичных опорных сетей всех крупных блоков ускорительного комплекса. Величина погрешности определения взаимного положения накопителя и бустера лежит в рекомендуемом практикой диапазоне  $\pm 3.0$  мм.

Вторичные геодезические опорные сети (**Рисунок 3.8.5**) служат основой непосредственно для установки физического оборудования и создаются для измерений лазерными трекерами. Достаточная точность для вторичных сетей по результатам уравнивания  $\pm 0.07$  мм. Достаточная плотность сети составляет 0.4 – 0.8 пункта на погонный метр туннеля.

**Таблица 3.8.1.** Исходные данные и технические решения для геодезического обеспечения ЦКП «СКИФ».

Стадии	Исходные данные	Технические решения	Геодезическая составляющая
Проектирование	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Координаты узловых точек орбиты</li> <li>2 Тех.характеристики магнитных элементов</li> <li>3 Спектральная чувствительность магнитной структуры</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Число и габариты гирдеров</li> <li>2 Рабочие диапазоны и конструкция юстировочных узлов</li> <li>3 Конструкция гирдеров адаптированная для геодезического контроля</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Оптимизация количества и расположения геодезических знаков на элементах</li> <li>2 Моделирование опорной геодезической сети для оптимизации по спектральному составу ошибок определения координат.</li> </ul>
Изготовление	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Точности в техническом задании</li> <li>2 Каталог координат узловых точек орбиты пучка</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Конструкция стапелей и кареток для магнитных измерений адаптированная для геодезического контроля.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Создание опорных сетей стапелей</li> <li>2 Определение взаимного положения геодезических знаков и магнитной оси элемента</li> <li>3 Создание каталога координат геодезических знаков элементов</li> <li>4 Геодезический контроль изготовления гирдеров</li> </ul>
Монтаж	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Каталог координат геодезических знаков магнитных элементов</li> <li>2 Проект размещения и компоновки физического оборудования ускорителя</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Количество и расположение геодезических знаков опорной сети в тоннеле ускорителя</li> <li>2 Технология сборки модулей</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Создание опорной геодезической сети в тоннеле ускорителя</li> <li>2 Геодезическое обеспечение сборки модулей</li> <li>3 Геодезическое обеспечение монтажа модулей в тоннеле</li> </ul>
Эксплуатация	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Каталог координат геодезических знаков магнитных элементов</li> <li>2 Каталог координат геодезических знаков опорной сети в тоннеле ускорителя</li> <li>3 Реальные условия и компоновка радиационной защиты</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Оптимизация схем измерений в геодезической опорной сети</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 Геодезический мониторинг</li> <li>2 Юстировка магнитных элементов ускорителя</li> </ul>

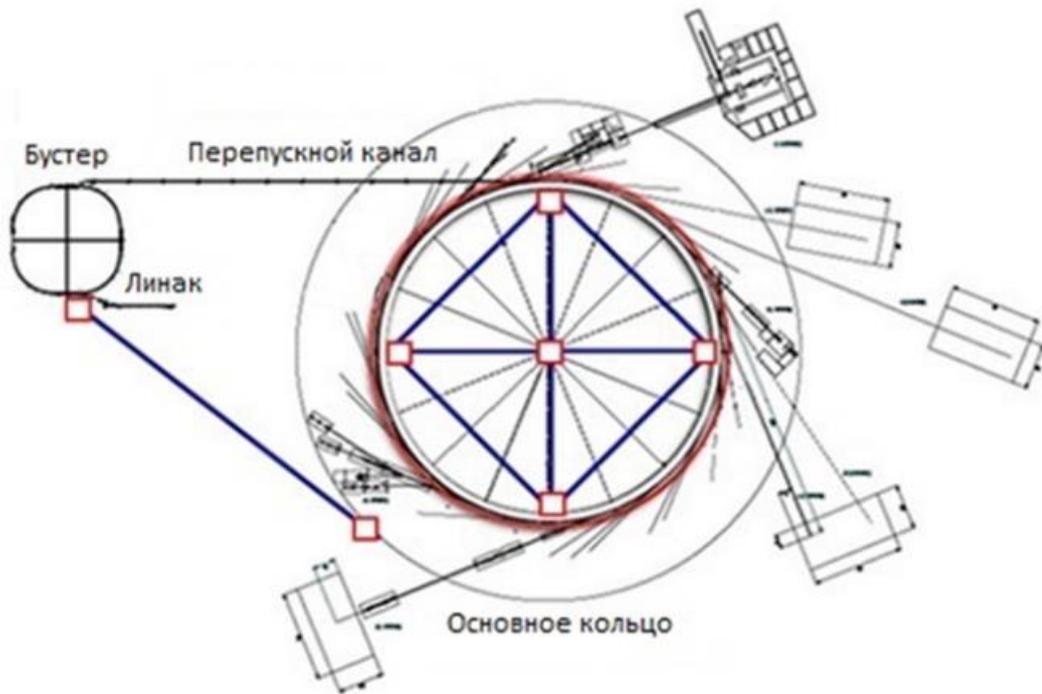


Рисунок 3.8.4. Вариант первичной сети источника СИ.

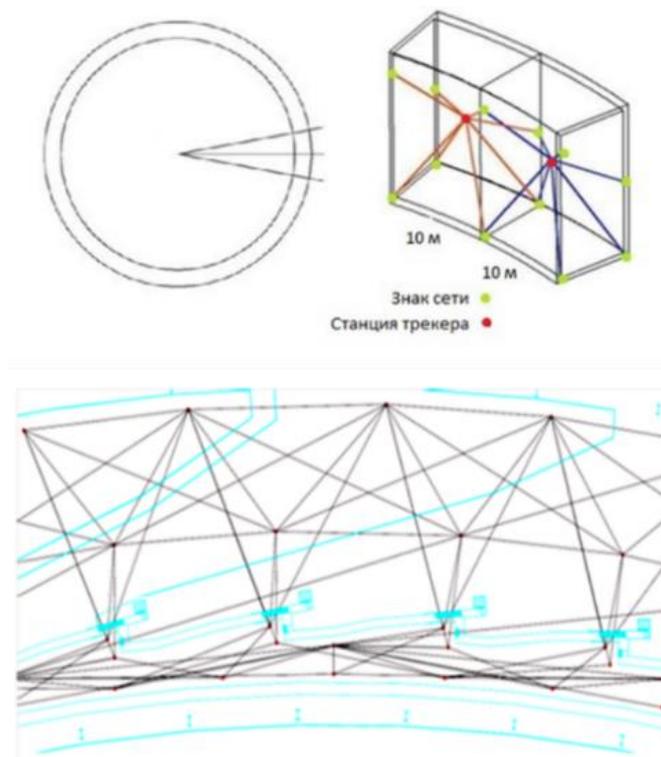
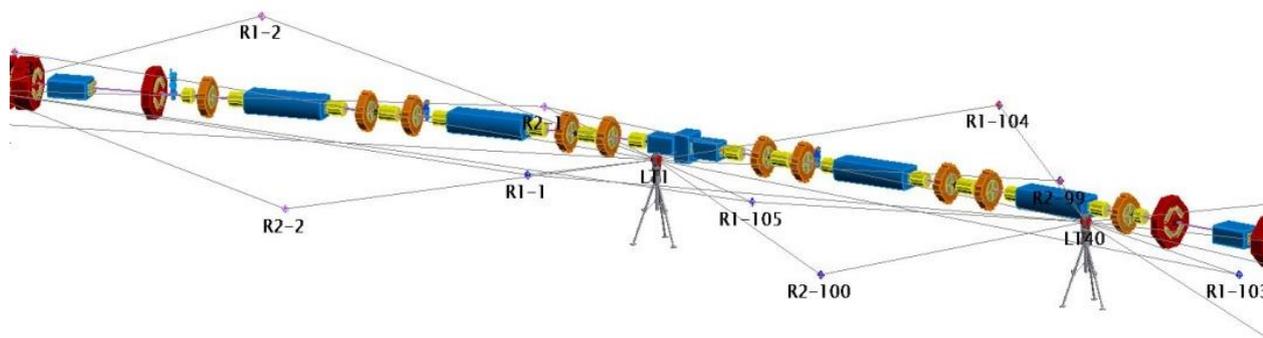


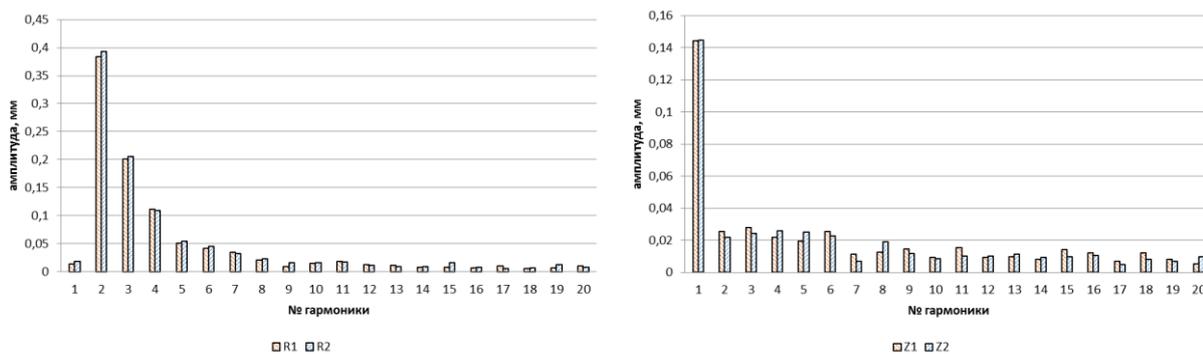
Рисунок 3.8.5. Фрагмент сети накопителя и сети области вывода СИ.

Схема измерений геодезической сети накопителя представлена на **Рисунке 3.8.6**. Измерения с трех станций лазерного трекера перекрывают длину одного суперпериода.



**Рисунок 3.8.6.** Схема измерений сети накопителя.

Спектральный состав погрешностей определения координат знаков сети по результатам уравнивания представлен на **Рисунке 3.8.7**.

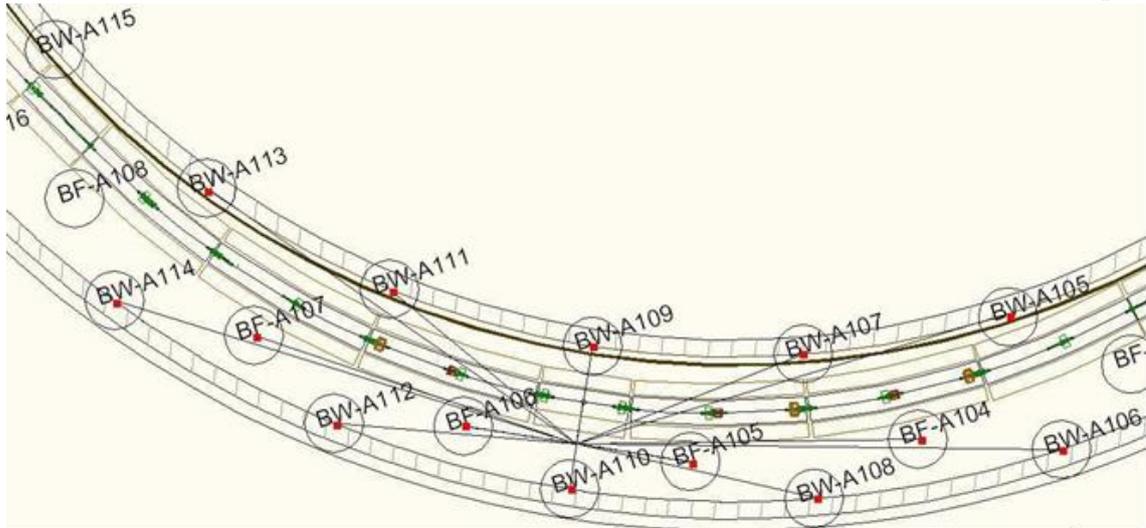


**Рисунок 3.8.7.** Спектральный состав погрешностей определения координат сети накопителя.

Пространственное положение геодезических знаков вторичной сети бустера определяется измерениями лазерным трекером с 36 станций. Схема измерений на одной станции показана на **Рисунке 3.8.8**.

Общий вид геодезических знаков вторичных сетей с магнитным держателем отражателя представлен на **Рисунке 3.8.9**. Предварительная оценка количества знаков вторичных сетей:

- Источник электронов и линейный ускоритель – 30;
- Синхротрон-бустер – 120;
- Каналы транспортировки пучка – 90;
- Основное накопительное кольцо СКИФ – 350;
- Фронт-энд, каналы и станции СИ – 250.



**Рисунок 3.8.8.** Схема измерений на станции сети бустера.



**Рисунок 3.8.9.** Геодезический знак вторичной сети.

Количество персонала для проведения геодезических измерений вторичных сетей СКИФ и монтажа физического оборудования в помещениях комплекса не менее 4 бригад по 2 человека на один измерительный комплекс (лазерный трекер).

## Список цитируемой литературы

- [1] Семенов А.М., Анашин В.В., Гуров С.М., Краснов А.А.. Статус и описание вакуумной системы бустера NSLS-II, Известия РАН. Серия физическая, 2015, Т. 79, №1. С. 58-62.
- [2] Haïssinski J., Thèse, Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay (1965), J. Le Duff. Current and current density limitations in the existing electron storage rings. NIM A239 (1985) 83-101.
- [3] H. Bethe and W. Heitler, Proc. Roy. Soc. A146, 83 (1934).
- [4] J.A. Wheeler, W.E. Lamb. Phys. Rev, 55, 858 (1939).
- [5] И.А. Кооп, Разработка и экспериментальное изучение фокусирующей структуры электрон-позитронного накопителя с большой светимостью (ВЭПП-2М), диссертация к.ф.-м.н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1976.

[6] <https://www.saesgetters.com/products-functions/products/neg-pumps%26vacuum-solutions>.

[7] D.J. Wang, J.R. Chen, G.Y. Hsiung, J.G. Shyy, J.R. Huang et al., Vacuum chamber for the wiggler of the Taiwan Light Source at the Synchrotron Radiation Research Center J.Vac.Sci.Tech.A 14 (1996) 2624.

[8] C. Benvenuti(CERN), J.M. Cazeneuve(CERN), P. Chiggiato(CERN), F. Cicoira(CERN), A. Escudeiro Santana(CERN) et al. A novel route to extreme vacua: The non-evaporable getter thin film coatings, Vacuum 53 (1999) 219-225 • DOI: 10.1016/S0042-207X(98)00377-7.

[9] R. Kersevan, Performance of a narrow-gap, NEG-coated, extruded aluminium vacuum chamber at the ESRF. Proc. of EPAC-2000, 26-30 June, Vienna, Austria, pp. 2289 – 2291.

[10] I.R. Collins, V.L. Ruzinov, O.B. Malyshev, V.V. Anashin, R.V. Dostovalov, N.V. Fedorov, A.A. Krasnov. A photodesorption study of a TiZrV coated stainless steel vacuum chamber" - EPAC-2002, Paris, France, June 2002. // Proc. of EPAC-2002, p.2550-2552.

[11] Е.В.Абакумова, В.В.Анашин, К.Балеwski, Р.Воеспflug, Г.А.Гусев, Е.Б.Левичев, А.А.Краснов, В.С.Кузьминых, В.Нагорну, Ю.А.Пупков, А.М.Семенов, В.В.Смалюк, М.Тischer, Н-Р.Wedekind, К.Zapfe, А.А.Жуков, К.В.Золотарев. Вакуумная система секций охлаждения пучка PETRA III. Вакуумная техника и технология. Том 21, №2, 2011, стр. 85 – 89.

[12] В.В.Анашин, А.А.Жуков, А.А.Краснов, А.М.Семенов. Установка магнетронного напыления геттерных покрытий в малоапертурных камерах. Приборы и техника эксперимента, 2009, №6, стр. 127-130.

[13] А.А. Краснов, Исследование и прогнозирование динамической плотности остаточных газов в вакуумных камерах современных ускорительно-накопительных комплексов, диссертация к.ф.-м.н., ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2012.

[14] O.B. Malyshev. Vacuum in Particle Accelerators: Modelling, Design and Operation of Beam Vacuum. Wiley VCH, Germany (2019). ISBN-10: 3527343024, ISBN-13: 978-3527343027.

[15] С.И. Мишнев, ИЯФ СО РАН, неопубликованные материалы.

[16] Y. Suetsugu, M. Shirai, and M. Ohtsuka, “Application of a Matsumoto-Ohtsuka-type vacuum flange to beam ducts for future accelerators”, J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 23(6), pp. 1721-1727, 2005.

[17] K. Shibata, Y. Suetsugu, T. Ishibashi, K. Kanazawa, M. Shirai, S. Terui, and H. Hisamatsu, “COMMISSIONING STATUS OF SuperKEKB VACUUM SYSTEM”, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 305-0817 Tsukuba, Ibaraki, Japan.

[18] [http://mo-ohtsuka.co.jp/features\\_of\\_moflange.html](http://mo-ohtsuka.co.jp/features_of_moflange.html).

[19] <https://hightechmetalseals.com/HTMS-High-Tech-Metal-Seals-Catalogue.pdf>.

[20] <http://www.lem.com>.

[21] <http://www.meanwell.com>.

[22] <http://www.meanwell.com>.

- [23] I. E.A. Bekhtenev, et al., “Fast Tune Measurement System”, RuPAC, 2012, <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/rupac2012/papers/weppd029.pdf>.
- [24] Е.Н. Дементьев и др., Запуск систем обратной связи на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М, Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7, №7 (163). С. 765-773.
- [25] Анчугов О. В., Дорохов В. Л., Куркин Г. Я. И др. // Автометрия. 2016. Т.52. №3. С.108.
- [26] A.S. Stirin et al. New Station for Optical Observation of Electron Beam Parameters at Electron Storage Ring SIBERIA-2 // Proc. of IPAC’14 (Dresden, Germany), pp.3611—3613.
- [27] O. Meshkov, V. Dorokhovand, V. Borin et al. Recent Results from New Station for Optical Observation of Electron Beam Parameters at KCSR Storage Ring // Proc. of IBIC’16 (Barcelona, Spain). Geneva, Switzerland, pp.509—512.
- [28] O. Meshkov et al. A new station for optical observation of electron beam parameters at electron storage ring SIBERIA-2 // Journal of Instrumentation, Dec.2016, V.11, #12.
- [29] T. Mitsuhashi, Proc. of the Joint US-CERN-Japan-Russia School on Particle Accelerators, Montreux, May 1998, 399-427.
- [30] T.M. Mitsuhashi, “Recent Trends in Beam Size Measurements Using Spatial Coherence of Visible Synchrotron Radiation”, IPAC15, Richmond, VA, USA (2015), paper THYC2.s.

*Научное издание*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА  
СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ «СКИФ»

Том 2

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Составитель **Левичев** Евгений Борисович

Обложка: А. М. Ершова

Подписано в печать 28.10.2022. Формат 60x90 1/8. Усл. печ. л. 43,06.

Тираж 30 экз. Заказ № 329.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г. К. Борескова  
Сибирского отделения Российской академии наук»  
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 5, <http://catalysis.ru>

Отпечатано в Сибирском отделении РАН  
630090, г. Новосибирск, Морской просп., 2  
Тел. (383) 330-84-66, e-mail: [e.lyannaya@sb-ras.ru](mailto:e.lyannaya@sb-ras.ru)