

Объединённый институт ядерных исследований

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Под общей редакцией И.Н. Мешкова, Г.В. Трубникова

ТОМ III

Дубна, 2015

И.Н. Мешков — научный руководитель проекта

Г.В. Трубников — руководитель проекта

А.В. Бутенко, А.О. Сидорин, Г.Г. Ходжибагиян — заместители руководителя проекта

Проект подготовлен авторским коллективом:

ОИЯИ — А.С. Аверичев, Н.Н. Агапов, В.С. Александров, А.В. Алфеев, В.А. Андреев, А.М. Базанов, В.И. Батин, Н.А. Блинов, В.В. Борисов, О.И. Бровка, А.В. Бутенко, В.Н. Бучнев, В.П. Вадеев, Б.В. Василишин, А.В. Вишневский, В.И. Волков, А.Р. Галимов, А.И. Говоров, Д.С. Гогов, Б.В. Головенский, О.М. Голубицкий, Е.В. Горбачев, А.Ю. Гребенцов, А.П. Дергунов, Д.Е. Донец, Е.Д. Донец, Е.Е. Донец, В.М. Дробин, А.В. Дударев, А.В. Елисеев, Н.Э. Емельянов, В.М. Жабицкий, Е.В. Иванов, В.А. Исадов, В.Н. Карпинский, Г.В. Карпов, В.Д. Кекелидзе, А.Е. Кириченко, А.Г. Кобец, В.В. Кобец, А.Д. Коваленко, О.С. Козлов, С.Ю. Колесников, А.В. Константинов, С.А. Костромин, А.Р. Крылов, В.А. Крылов, А.В. Кудашкин, С.И. Кукарников, О.А. Кунченко, Л.В. Кутузова, Н.И. Лебедев, К.А. Левтеров, Р. Ледницы, Д.А. Люосев, А.А. Макаров, Х. Малиновски, В.А. Матвеев, И.Н. Мешков, Ю.А. Митрофанова, В.А. Михайлов, В.А. Мончинский, Н.В. Морозов, А.В. Нестеров, Д.Н. Никифоров, Ю.М. Ноженко, М.М. Омеляненко, А.Л. Осипенков, Р.В. Пивин, Н.В. Пиляр, Д.А. Понкин, Ю.В. Прокофьевичев, С.В. Рабцун, А.Ю. Рамздорф, С.В. Романов, П.А. Рукояткин, Т.В. Рукояткина, В.В. Сальников, С.Н. Седых, В.В. Селезнёв, Н.В. Семин, Е.В. Серочкин, А.О. Сидорин, А.И. Сидоров, В.М. Слепнёв, И.В. Слепнёв, А.В. Смирнов, З.И. Смирнова, А.С. Сорин, А.Ю. Стариков, Е.М. Сыресин, Г.Н. Тимошенко, Н.Д. Топилин, Г.В. Трубников, А.В. Тузиков, А.А. Фатеев, А.В. Филиппов, Н.А. Филиппов, В.В. Фимушкин, Г.Г. Ходжибагиян, А.В. Шабунов, В.С. Швецов, К.В. Шевченко, В.И. Шокин, В.М. Шумков, Н.А. Шурхно, А.А. Шурыгин, В.Ю. Щёголев

В подготовке проекта участвовали:

ВЭИ им. В.И. Ленина — М.П. Кокуркин, Н.Ю. Лысов

ИЯИ РАН — А.С. Белов, С.А. Гаврилов, Л.В. Кравчук, С.А. Крутихин, А.М. Пилан, П.И. Рейнгардт-Никулин, Е.А. Ротов

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН — А.М. Батраков, М.И. Брызгунов, А.В. Бублей, Г.Я. Куркин, В.М. Петров, В.А. Полухин, А.В. Рева, А.Г. Трибендис, Г.А. Фатькин

НИЦ «Курчатовский институт» ИТЭФ им. И.А. Алиханова — В.А. Андреев, А.Е. Большаков, А.А. Голубев, А.В. Козлов, А.А. Коломиец, В.А. Кошелев, Г.Н. Кропачев, В.Г. Кузьмичев, Р.П. Куйбида, Т.В. Кулевой, Д.А. Лякин, А.С. Пластун, Д.Н. Селезнёв

НИЦ «Курчатовский институт» ИФВЭ — О.К. Беляев, Ю.А. Буданов, И.А. Звонарев, Н.Е. Тюрин

НИЯУ МИФИ — С.М. Полозов

ИЯИЯЭ БАН, Болгария — Д. Динев, В. Ангелов, А. Ангелов

ИПИ САН, Словакия — Р. Гаврила, И. Герек, Л. Ондриш

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 6	КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ НУКЛОТРОН — КОЛЛАЙДЕР	7
6.1	Назначение	9
6.2	Структура канала	9
6.3	Динамика ионов	12
6.4	Элементы магнитной системы	14
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 К ГЛАВЕ 6		17
П.6.1 Распределения магнитных полей элементов канала транспортировки Нуклотрон — Коллайдер		19
П.6.1.1 Магнитное поле дипольного магнита		19
П.6.1.2 Магнитное поле квадрупольной линзы		21
П.6.1.3 Магнитное поле дипольного корректора		25
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 К ГЛАВЕ 6		29
П.6.2 Подавление вертикальной дисперсии в канале транспортировки Нуклотрон — Коллайдер		31
П.6.2.1 Вариант 1		31
П.6.2.2 Вариант 2		31
П.6.2.3 Вариант 3		32
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 К ГЛАВЕ 6		33
П.6.3 Динамика ионных пучков в канале транспортировки Нуклотрон — Коллайдер		35
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 К ГЛАВЕ 6		39
П.6.4 Магнитная система		41
П.6.4.1 Дипольные магниты		41
П.6.4.2 Квадрупольные линзы		43
П.6.4.3 Дипольные корректоры		45
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 К ГЛАВЕ 6		49
П.6.5 Система питания магнитных элементов		51
П.6.5.1 Шкафы питания дипольных магнитов		51
П.6.5.2 Шкафы питания квадрупольных линз		55
П.6.5.3 Шкафы питания дипольных корректоров		58
ГЛАВА 7	КОЛЛАЙДЕР	61
7.1	Основные параметры, оптическая структура и динамика пучка, система коррекции	63
7.1.1 Введение		63
7.1.2 Оптическая структура кольца		63
7.1.3 Системы коррекции магнитного поля Коллайдера		66
7.1.4 Расчёт динамической апертуры кольца		70
7.2	Магнитная система	71
7.3	Системы питания, защиты и эвакуации энергии	75
7.3.1 Подробное описание и аналоги		75

7.3.2	Требования к системе	75
7.3.3	Краткое описание системы	76
7.3.4	Размещение оборудования	78
7.4	Вакуумная система	81
7.5	Системы инъекции и сброса пучка	84
7.5.1	Система инъекции пучка	84
7.5.2	Динамика ионов	86
7.5.3	Элементы системы инъекции	86
7.5.4	Система аварийного сброса пучка Коллайдера	87
7.6	ВЧ станции Коллайдера	88
7.6.1	Схема и общие параметры ВЧ-систем при накоплении и подготовки сгустка	89
7.6.2	Выбор кратности ВЧ2	90
7.6.3	Выбор кратности ВЧ3	90
7.6.4	Выбор требуемой амплитуды ВЧ напряжения	91
7.6.5	Барьерная ВЧ система	92
7.6.6	Гармонические системы Коллайдера ВЧ2 и ВЧ3	101
7.6.7	Динамика $^{197}\text{Au}^{78+}$ ионов в Коллайдере	106
7.7	Система стохастического охлаждения	112
7.7.1	Расположение элементов системы	117
7.7.2	Основное оборудование системы	119
7.7.3	Программное обеспечение	120
7.7.4	Система стохастического охлаждения для стартовой версии комплекса	120
7.8	Система электронного охлаждения	120
7.9	Система обратной связи	127
7.9.1	Введение	127
7.9.2	Основные спецификации СП	127
7.9.3	Блок-схема СП	130
7.9.4	Цифровая обработка сигнала в СП	136
7.9.5	Перечень основного оборудования	138
7.9.6	Заключение	139
	Литература	140

Глава 6

Канал

транспортировки

Нуклотрон —

Коллайдер

6.1 НАЗНАЧЕНИЕ

Канал транспортировки Нуклотрон — Коллайдер служит для поочередного перевода пучка из Нуклотрона в кольца Коллайдера с минимальными потерями. В процессе перевода производится согласование поперечного фазового портрета ионов с акцептансом Коллайдера. Согласование пучка осуществляется по всем структурным функциям, за исключением вертикальной дисперсии и её производной, которые зануляются.

В Таблице 6.1.1 приведены основные параметры пучка в канале транспортировки.

Таблица 6.1.1. Основные параметры пучка в канале транспортировки Нуклотрон — Коллайдер

Ионы	$^{197}\text{Au}^{79+}$
Интенсивность	$1 \cdot 10^9$
Энергия ионов, ГэВ/н	$1 \div 4,5$
Магнитная жёсткость ионов, Тл·м	$14 \div 45$
Эффективность перевода, %	95
Горизонтальный/вертикальный 95 %-ный эмиттанс, π -мм·мрад	$< 14 / < 6$

6.2 СТРУКТУРА КАНАЛА

Канал транспортировки Нуклотрон — Коллайдер располагается как в существующих, так и во вновь возводимых зданиях ЛФВЭ. Канал выходит из туннеля Нуклотрона (цокольного этажа корпуса № 1), проходит пристройку к корпусу № 1 и через помещение КТП (Канала транспортировки пучка) входит в туннель Коллайдера (полукольцо Е здания № 17).

Канал разбит на следующие участки:

- головная часть;
- общий участок;
- северная ветвь канала;
- южная ветвь канала.

Головная часть располагается в корпусе № 1 и обеспечивает перевод пучка из туннеля Нуклотрона в горизонтальную плоскость на отметке +1,500 м над уровнем чистого пола здания Коллайдера. Головная часть включает в себя участок от системы быстрого вывода из Нуклотрона до выхода из корпуса № 1. Представляет собой пучковую камеру с минимальным набором структурных элементов (квадрупольные линзы — 2 шт., поворотные магниты — 2 шт., корректирующие магниты — 6 шт.).

Общий участок располагается за головной частью и заканчивается секцией разветвления. Участок обеспечивает транспортировку пучка в горизонтальной плоскости на отметке +1,500 м в пристройке

корпуса № 1. Секция разветвления содержит переключающий дипольный магнит, служащий для перевода пучка в ту или иную ветвь канала.

Южная (S) и северная (N) ветви канала состоят из горизонтальных арок, прямолинейных секций, согласующих секций вертикального переноса и секций инжекции. Большая горизонтальная арка S-ветви обеспечивает поворот пучка в горизонтальной плоскости на угол $24,2^\circ$, большая горизонтальная арка N-ветви — поворот пучка на угол $42,2^\circ$. Малая горизонтальная арка S-ветви обеспечивает поворот пучка на угол $1,2^\circ$ и включает в себя 1 дипольный магнит. Малая горизонтальная арка N-ветви обеспечивает поворот пучка на угол $6,7^\circ$. Большая и малая прямолинейные секции S-ветви имеют длины 97,2 м и 31,8 м соответственно. N-ветвь имеет только одну (большую) прямолинейную секцию длиной 99,6 м. Согласующие секции вертикального переноса располагаются в больших прямолинейных секциях ветвей канала. Две согласующие секции вертикального переноса S-ветви в два этапа выводят пучок на уровень верхнего кольца Коллайдера. Транспортировка пучка в большой прямолинейной секции S-ветви производится на отметках +1,500 м, +0,500 м и +1,660 м над уровнем чистого пола здания № 17. Две согласующие секции вертикального переноса N-ветви в два этапа выводят пучок на уровень нижнего кольца Коллайдера. Транспортировка пучка в большой прямолинейной секции N-ветви производится на отметках +1,500 м, +0,500 м и +1,340 м над уровнем чистого пола здания № 17. Секции инжекции представляют собой короткие прямолинейные участки в концах ветвей канала непосредственно перед входами пучка в криостат Коллайдера.

Длина головной части и общего участка — 27 м. Длина левой ветви — 154 м. Длина правой ветви — 144 м. Полная длина канала — 325 м.

Горизонтальная проекция канала транспортировки Нуклотрон — Коллайдер представлена на Рис. 6.2.1. Вертикальные профили головной части канала и согласующих секций вертикального переноса приведены на Рис. 6.2.2, 6.2.3.

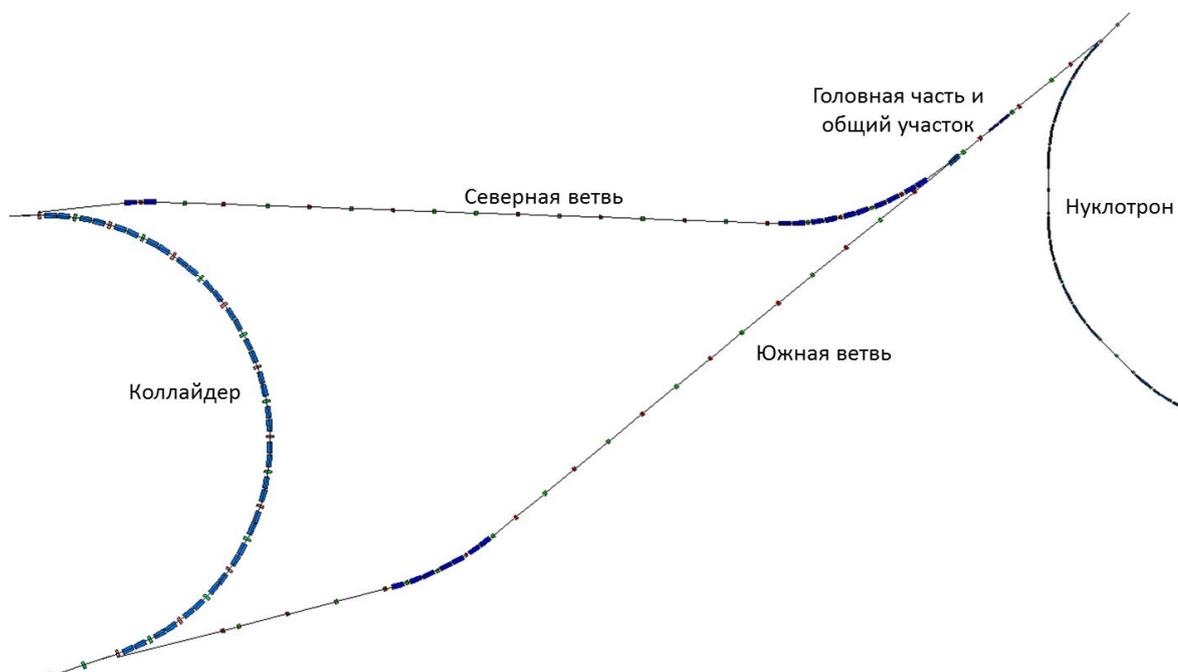


Рис. 6.2.1. Горизонтальная проекция канала транспортировки Нуклотрон — Коллайдер

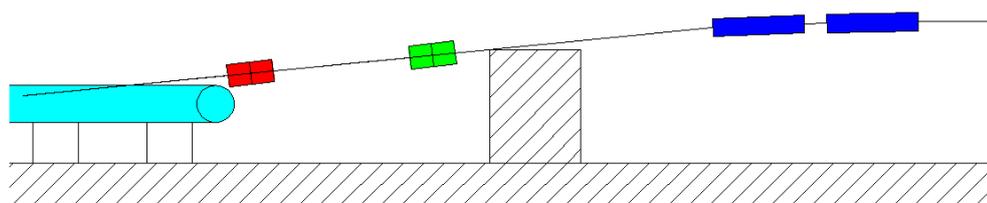


Рис. 6.2.2. Головная часть канала транспортировки Нуклотрон — Коллайдер

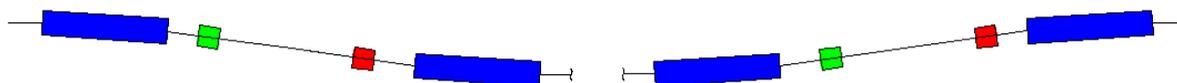


Рис. 6.2.3. Пара согласующих секций вертикального переноса

Ионно-оптическая система (ИОС) канала транспортировки состоит из 33 дипольных магнитов, 45 квадрупольных линз и 36 дипольных корректоров. Поперечное согласование пучка со структурными функциями Коллайдера осуществляется дипольными магнитами и квадрупольными линзами канала. Коррекция траектории пучка в канале производится системой дипольных корректоров.

Диагностика пучка в канале заключается в измерении его интенсивности, положения, профиля, поперечного эмиттанта, энергии ионов, энергетического разброса, интенсивности потерь транспортируемых ионов. Для указанных целей используются:

- 1) трансформаторы тока;

- 2) пикап-электроды;
- 3) проволочные профилометры;
- 4) ионизационные мониторы;
- 5) эмиттансометр;
- 6) измеритель энергии пучка;
- 7) измеритель энергетического разброса;
- 8) мониторы потерь ионов.

Вакуумная система канала содержит посты откачки, вакуумные шиберы и вакуумную камеру (ионопровод) с системой прогрева. Посты откачки предназначены для создания рабочего вакуума порядка 10^{-10} Торр и контроля давления в пучковом объёме канала транспортировки. Вакуумные шиберы служат для разделения пучкового объёма канала на независимые части и его отсекания от смежных колец Коллайдера и Нуклотрона. Система прогрева вакуумной камеры предназначена для предварительного нагревания стенок ионопровода до $200 \div 300^\circ\text{C}$ с целью уменьшения десорбции. Вакуумное оборудование канала аналогично оборудованию для «тёплых» участков колец Коллайдера.

6.3 ДИНАМИКА ИОНОВ

Для определения положений и характеристик элементов ионно-оптической системы канала была проведена серия расчётов динамики ионных пучков в канале транспортировки. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD. В расчётах использовались результаты моделирования магнитных полей элементов канала, приведенные в Приложении 6.1.

Моделирование показало, что наиболее сложной проблемой канала с точки зрения ионной оптики является согласование вертикальной дисперсии пучка с Коллайдером. Следует отметить, что в данном случае точное согласование вертикальной дисперсии практически эквивалентно её полному подавлению (занулению), т.к., несмотря на то, что в кольцах Коллайдера вертикальная дисперсия подавляется не полностью, её значение в точках инжекции пренебрежимо мало (около 3 см).

Наилучшим решением проблемы подавления вертикальной дисперсии в канале является ахроматический вывод пучка из туннеля Нуклотрона в плоскости колец Коллайдера, выполняемый полностью в головной части канала. Но данное решение, по ряду причин, не удаётся использовать

в канале Нуклотрон — Коллайдер. Реализуемым решением являются ионно-оптические секции с вертикальными дипольными магнитами (согласующие секции вертикального переноса), размещаемые далее в ветвях канала. Наиболее подходящим местом являются большие прямолинейные секции северной и южной ветвей.

Наиболее гибким вариантом представляется подавление вертикальной дисперсии в каждой ветви с помощью двух согласующих секций вертикального переноса. Вертикальный профиль канала в данном случае выглядит следующим образом. В головной части канала пучок поднимается из туннеля Нуклотрона в медианную плоскость колец Коллайдера на отметку +1,500 м. В ветвях канала устанавливаются по две пары вертикальных дипольных магнитов с дуплетами квадрупольных линз (собственно согласующие секции), переводящих пучок сначала на отметку +0,500 м, а затем в плоскость принимающего кольца Коллайдера (на отметку +1,340 м или +1,660 м). Подавление вертикальной дисперсии достигается путём подбора набега фазы вертикальных бетатронных колебаний на участке между согласующими секциями (с помощью настройки квадрупольных линз).

Подробнее о вариантах решения проблемы подавления вертикальной дисперсии в канале см. Приложение 6.2.

По результатам моделирования динамики ионов была выработана следующая концепция настройки ИОС канала:

- Квадрупольные линзы головной части канала настраиваются так, что минимизируется вертикальный дисперсионный инвариант пучка ($I_{Dy} = \gamma_y D_y^2 + 2\alpha_y D_y D_y' + \beta_y D_y'^2$, где β_y , α_y , γ_y — вертикальные параметры Твисса, D_y , D_y' — вертикальная дисперсия и её производная).
- Квадрупольные линзы больших прямолинейных секций ветвей настраиваются на согласование параметров Твисса и подбор набега фазы горизонтальных бетатронных колебаний.
- Квадрупольные линзы согласующих секций вертикального переноса и прямолинейных участков между ними настраиваются на подбор набега фазы вертикальных бетатронных колебаний.
- Квадрупольные линзы малой прямолинейной секции, большой и малой арок южной ветви канала настраиваются на согласование горизонтального дисперсионного инварианта пучка ($I_{Dx} = \gamma_x D_x^2 + 2\alpha_x D_x D_x' + \beta_x D_x'^2$, где β_x , α_x , γ_x — горизонтальные параметры Твисса, D_x ,

D'_x — горизонтальная дисперсия и её производная) между Нуклотроном и верхним Коллайдером.

- Квадрупольные линзы большой арки северной ветви канала настраиваются на согласование горизонтального дисперсионного инварианта пучка между Нуклотроном и малой аркой этой ветви.
- Квадрупольные линзы малой арки северной ветви канала настраиваются на минимизацию горизонтального дисперсионного инварианта пучка.

Некоторые результаты моделирования динамики пучка освещены в Приложении 6.3.

6.4 ЭЛЕМЕНТЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Магнитная система канала включает в себя дипольные магниты, квадрупольные линзы и дипольные корректоры. Магнитные элементы канала нормально-проводящие, разработаны сотрудниками ИЯФ им. Г.И. Будкера, Новосибирск.

Дипольные магниты имеют эффективную длину 2 м. Зазор между полюсами магнитов — 100 мм. Максимальное магнитное поле — 1,5 Тл. Соответствующий максимальный ток в обмотках — 5 кА.

Квадрупольные линзы имеют эффективную длину 0,5 м. Диаметр вписанной в полюса окружности — 100 мм. Максимальный градиент магнитного поля — 20 Тл/м, соответствующий максимальный ток в обмотках — 2,6 кА.

Дипольные корректоры имеют длину 0,39 м. Магнитный зазор — 100 мм. Максимальное магнитное поле — 0,154 Тл. Соответствующий максимальный ток в обмотках — 125 А.

На Рис. 6.4.1 – Рис. 6.4.3 показаны магнитные элементы канала.

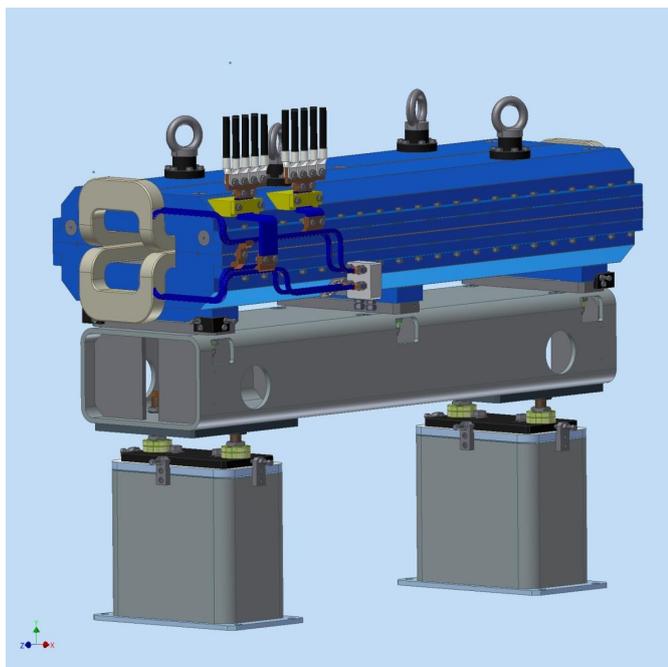


Рис. 6.4.1. Дипольный магнит на подставке

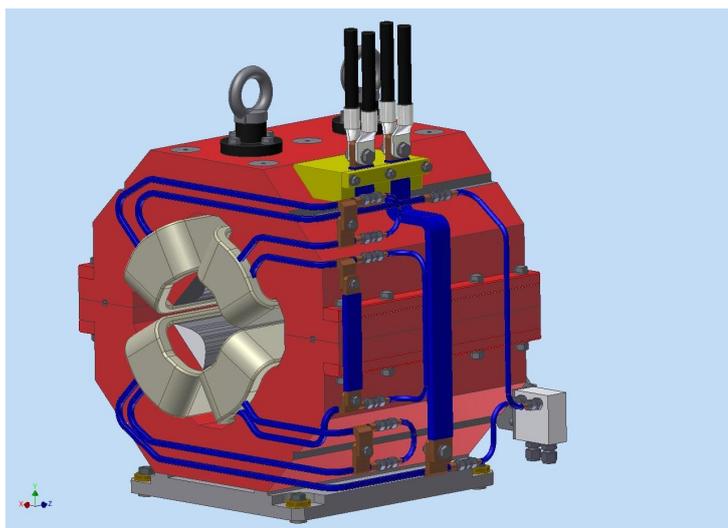


Рис. 6.4.2. Квадрупольная линза

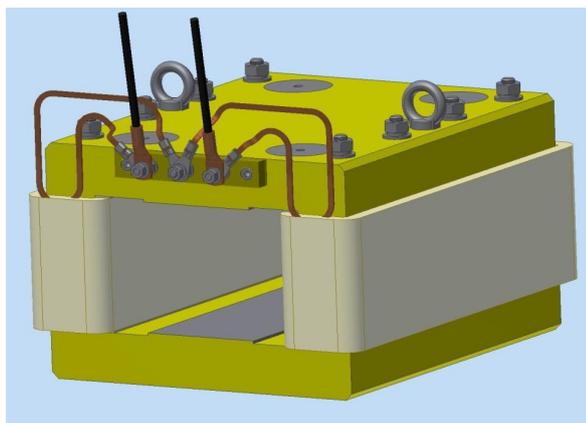


Рис. 6.4.3. Дипольный корректор

Магнитные элементы канала работают в импульсном режиме. Максимальная частота повторения импульсов зависит от места положения элемента в канале: 0,25 Гц в головной части и на общем участке, исключая переключаящий магнит секции разветвления; 0,125 Гц в остальной части канала.

Для питания магнитной системы канала служат источники питания дипольных магнитов, источники питания квадрупольных линз и источники питания дипольных корректоров. Источники размещаются в шкафах в следующих помещениях:

- в пристройке к корпусу № 1 (внутри зоны запрета), на участке, отгороженном перегородкой от трассы канала;
- на втором этаже здания № 17 (вне зоны запрета), в помещениях импульсных источников питания (ИИП).

Источники питания генерируют импульсы тока, имеющие форму полусинусоиды. Длительности импульсов: 46,2 мс для дипольного магнита; 10 мс для квадрупольной линзы; 5 мс для дипольного корректора. Амплитуды тока: 5 кА, 2,6 кА и 125 А для дипольного магнита, квадрупольной линзы и дипольного корректора соответственно.

Подробное описание элементов магнитной системы, включая шкафы питания, приведено в Приложениях 6.4 – 6.5.

Приложение 1 к Главе 6

П.6.1 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ НУКЛОТРОН — КОЛЛАЙДЕР

П.6.1.1 Магнитное поле дипольного магнита

На Рис. П.6.1.1 – Рис. П.6.1.5 представлены результаты моделирования распределения полей дипольных магнитов.

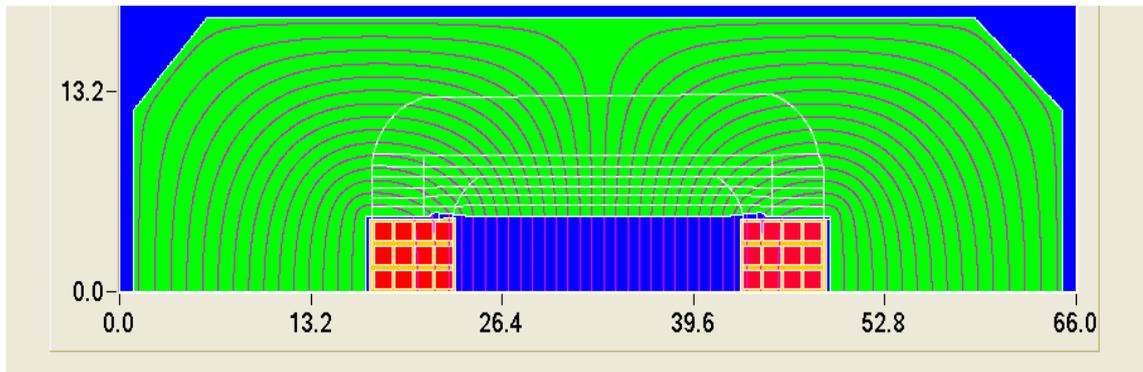


Рис. П.6.1.1. Геометрия $\frac{1}{2}$ магнита и силовые линии магнитного поля

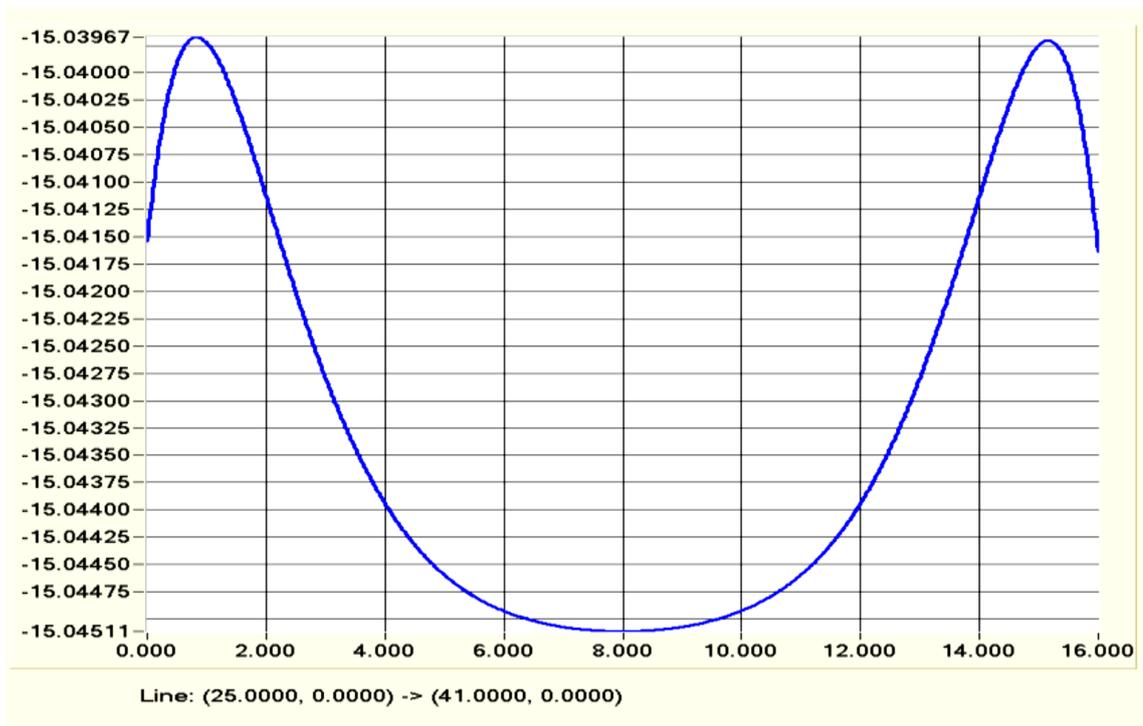


Рис. П.6.1.2. Распределение магнитного поля (в кГс) в апертуре магнита в области ± 80 мм

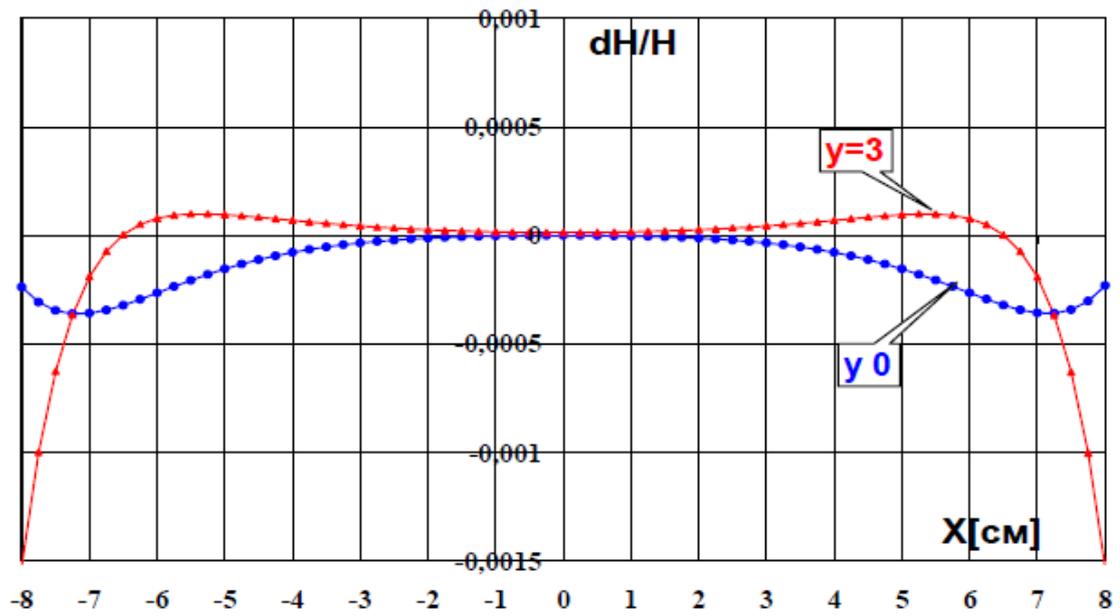


Рис. П.6.1.3. Неоднородность поля в центре магнита (зависимость от X) для $Y = 0$ и $Y = 3$ см

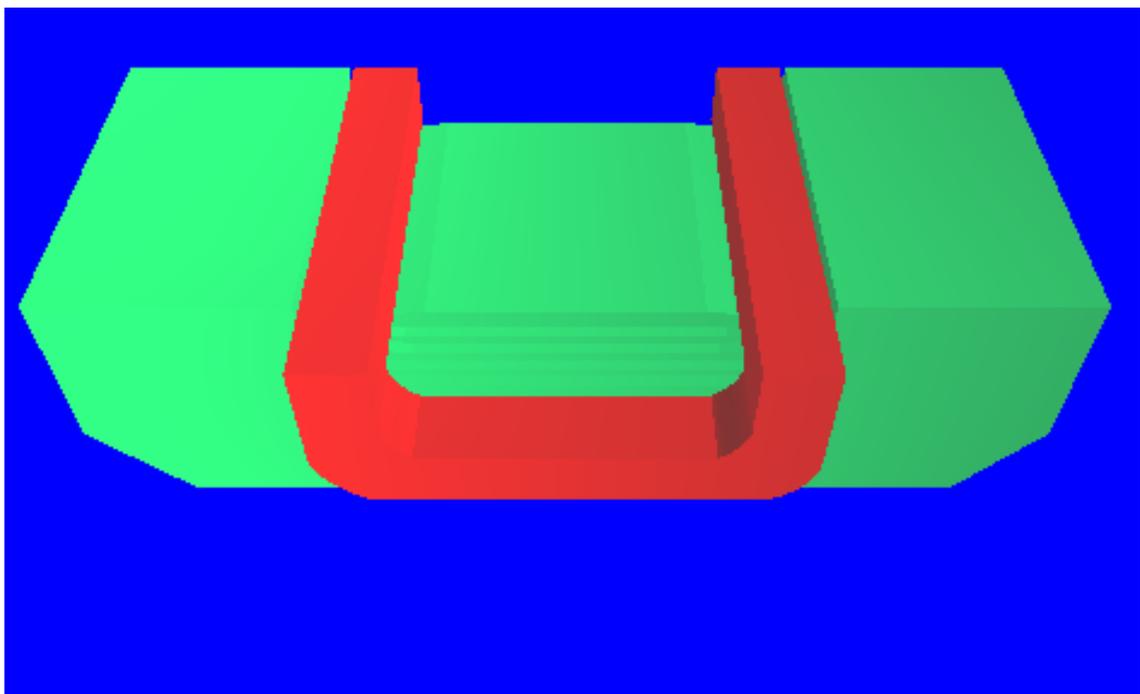


Рис. П.6.1.4. Трёхмерная модель торца магнита с фаской в железе

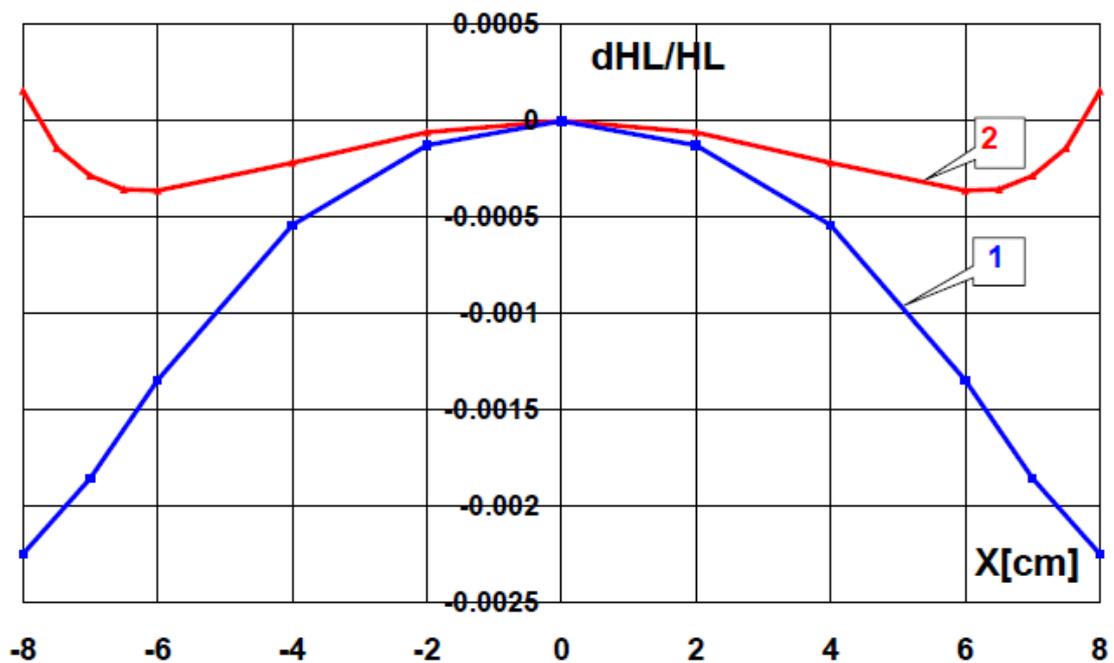


Рис. П.6.1.5. Интегральная неоднородность поля в магните от X ($Y = 0$), без торцевой фаски (1) и с торцевой фаской (2).

Из Рис. П.6.1.5 видно, что интегральная неоднородность из-за развала поля на краях магнита становится заметно больше неоднородности поля в центре магнита. Для коррекции развала поля и насыщения железа на краях используются торцевые фаски. В данном случае достаточно срезать железо на торцах магнита под углом 38 градусов на длине 5 см (Рис. П.6.1.4), чтобы получить однородность интеграла поля не хуже, чем однородность поля в центре магнита.

П.6.1.2 Магнитное поле квадрупольной линзы

На Рис. П.6.1.6 – Рис. П.6.1.11 представлены результаты моделирования распределения полей квадрупольных линз.

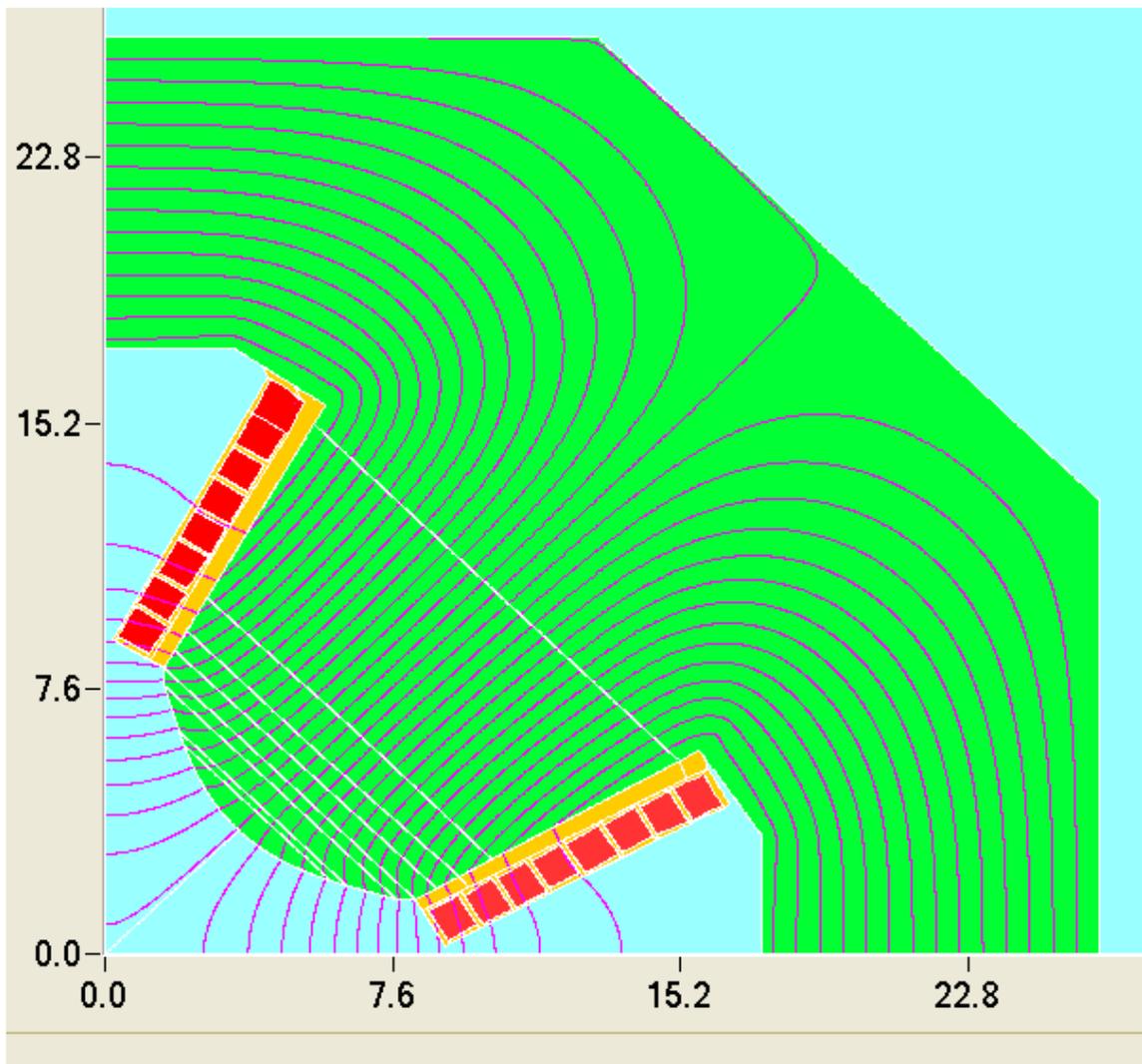


Рис. П.6.1.6. Геометрия ¼ линзы и силовые линии магнитного поля

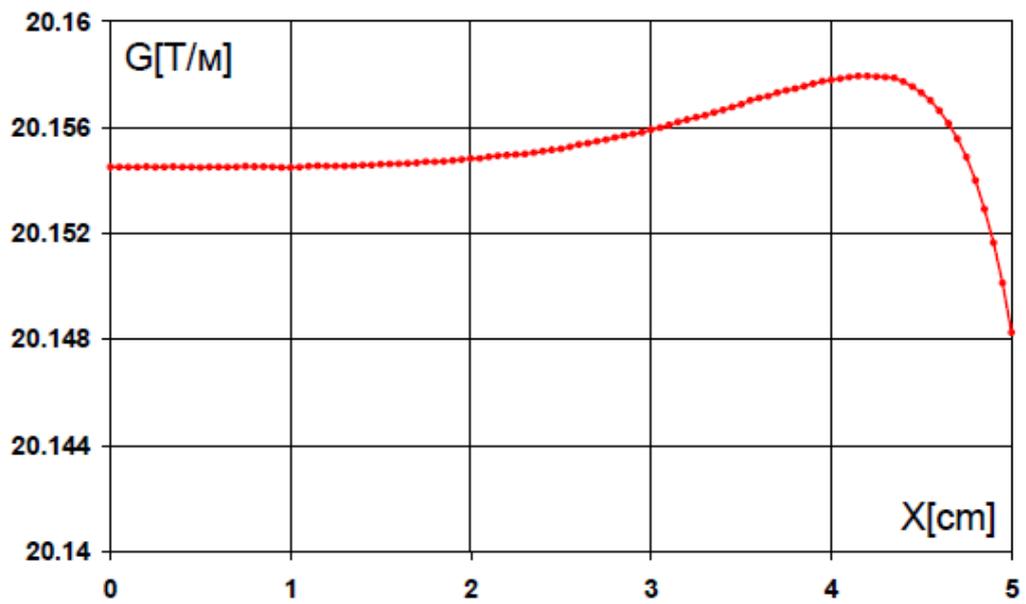


Рис. П.6.1.7. Распределение градиента в центре линзы от радиуса

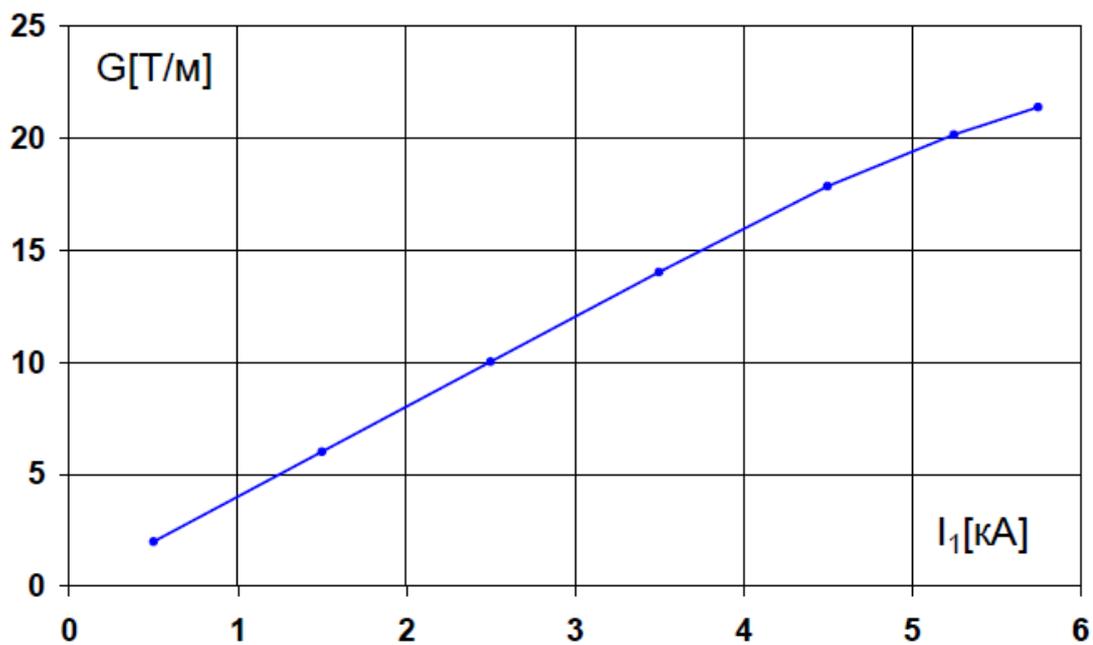


Рис. П.6.1.8. Зависимость градиента линзы от тока

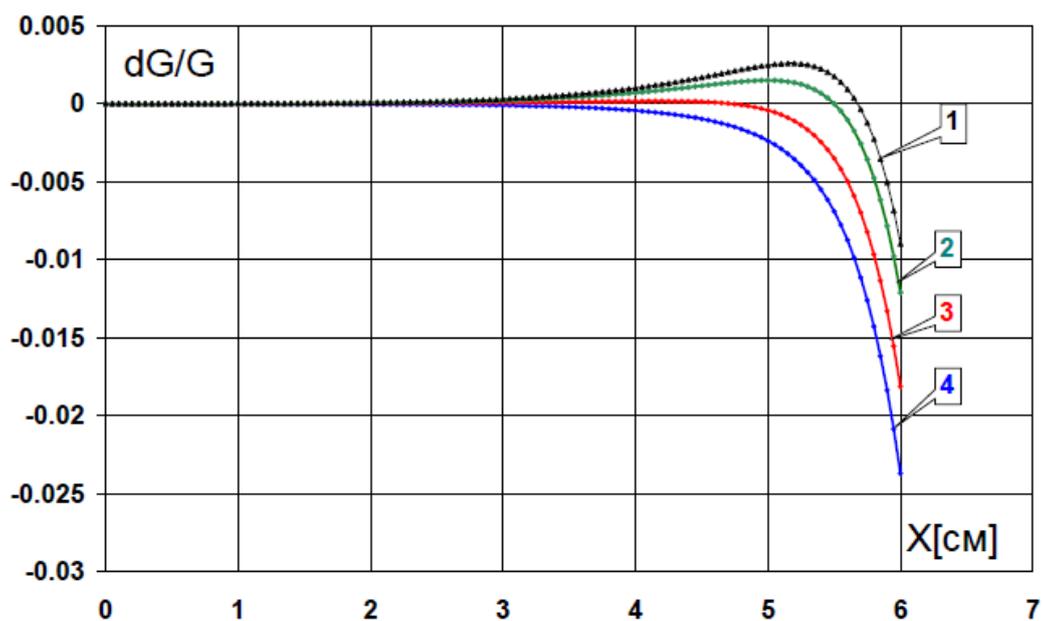


Рис. П.6.1.9. Неоднородность градиента в центре линзы в зависимости от X , при различных токах возбуждения: 1 — 0,5 кА, 2 — 4,5 кА, 3 — 5,25 кА, 4 — 5,75 кА

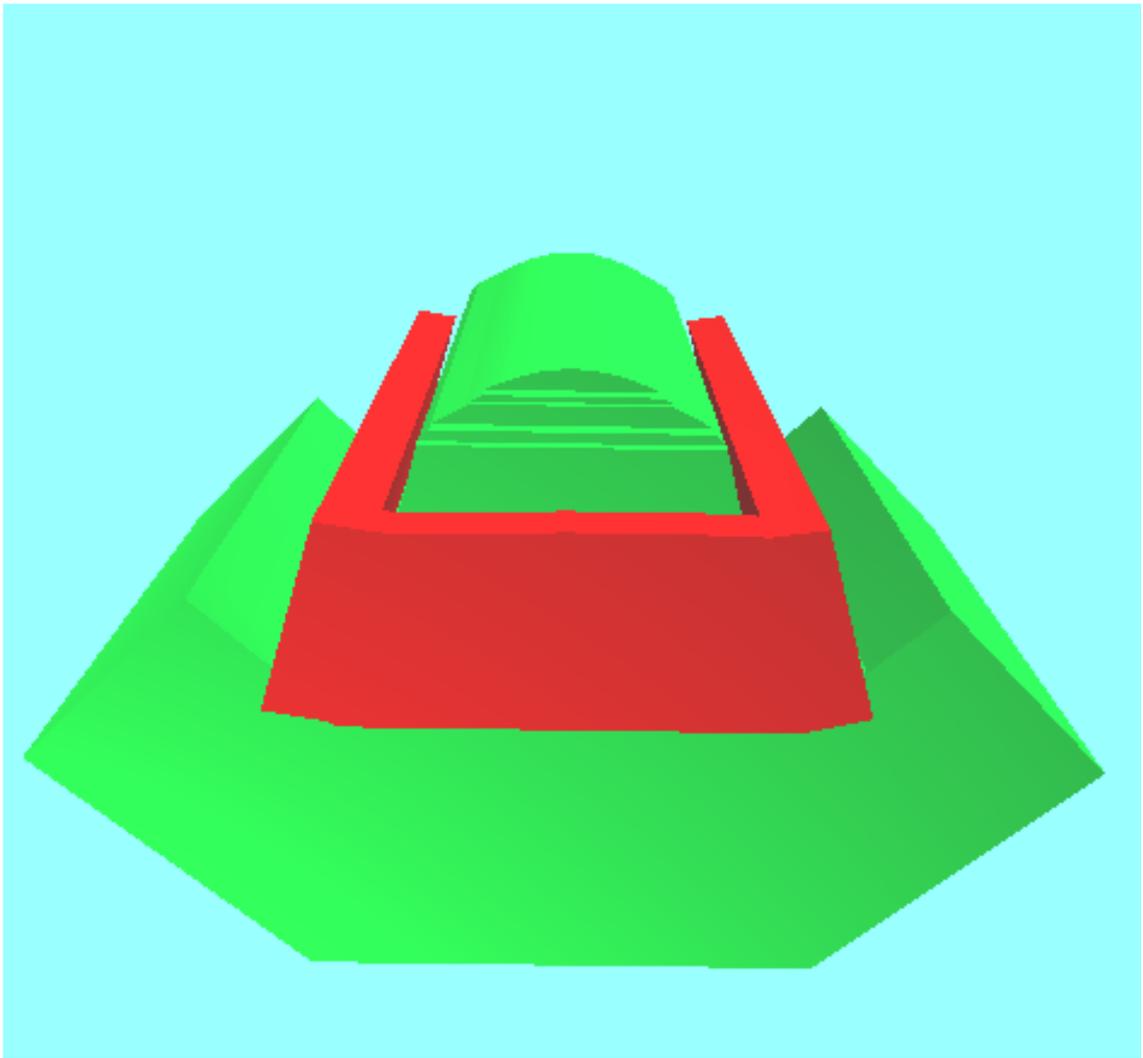


Рис. П.6.1.10. Трёхмерная модель торца линзы с фаской в железе

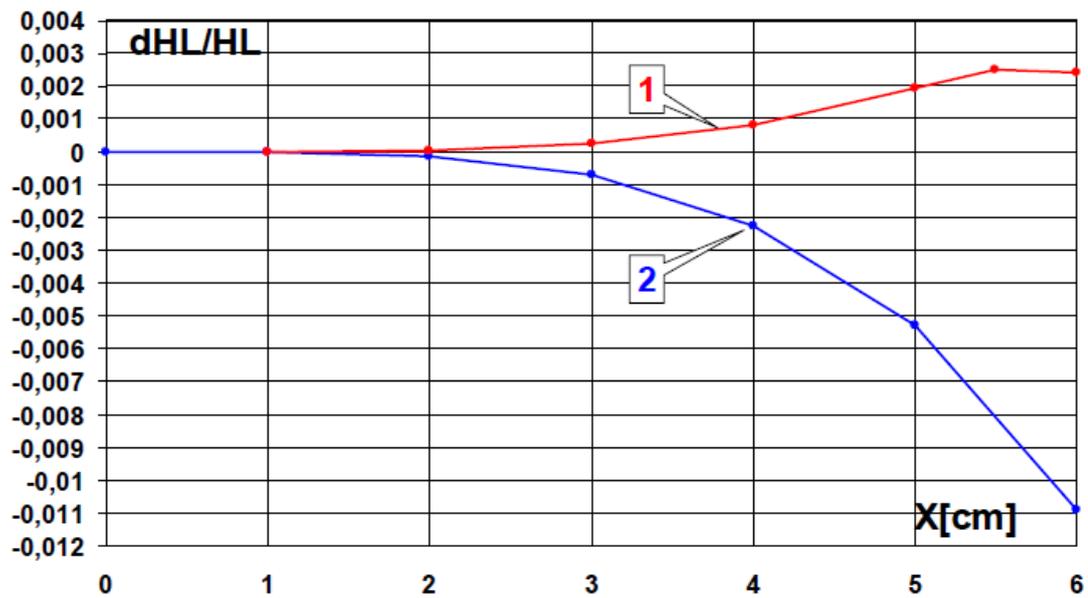


Рис. П.6.1.11. Интегральная неоднородность градиента в линзе от X ($I = 5.25$ кА). 1 — простая фаска под углом 45 градусов на длине 1,9 см; 2 — без торцевой фаски

П.6.1.3 Магнитное поле дипольного корректора

На Рис. П.6.1.12 – Рис. П.6.1.17 представлены результаты моделирования распределения полей дипольных корректоров.

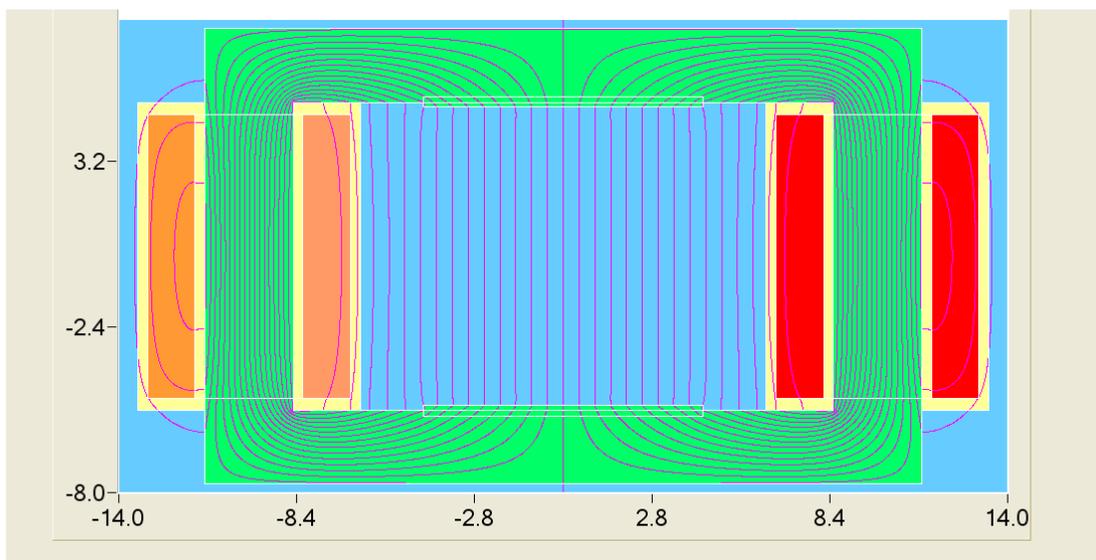


Рис. П.6.1.12. Геометрия корректора и силовые линии магнитного поля

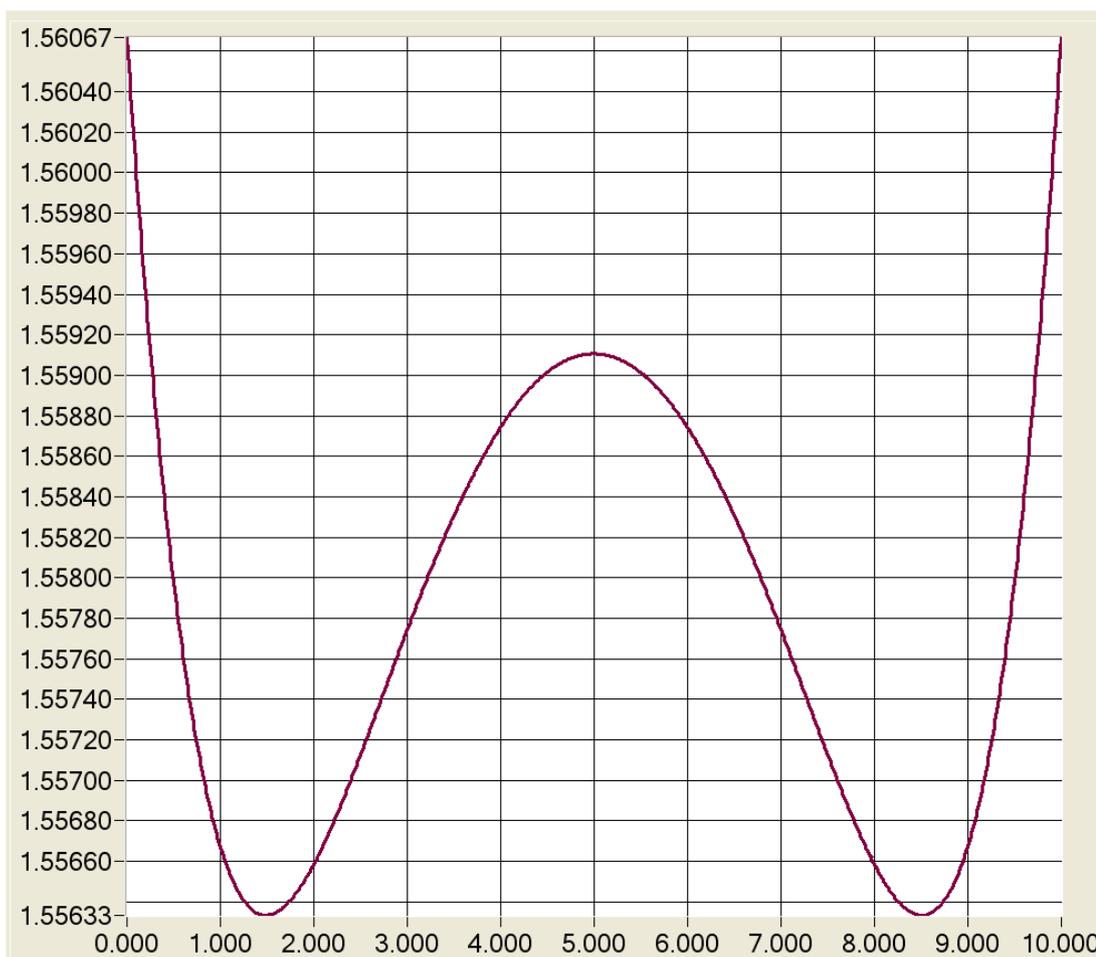


Рис. П.6.1.13. Распределение поля (в кГс) в центре корректора в области $X = \pm 50$ мм

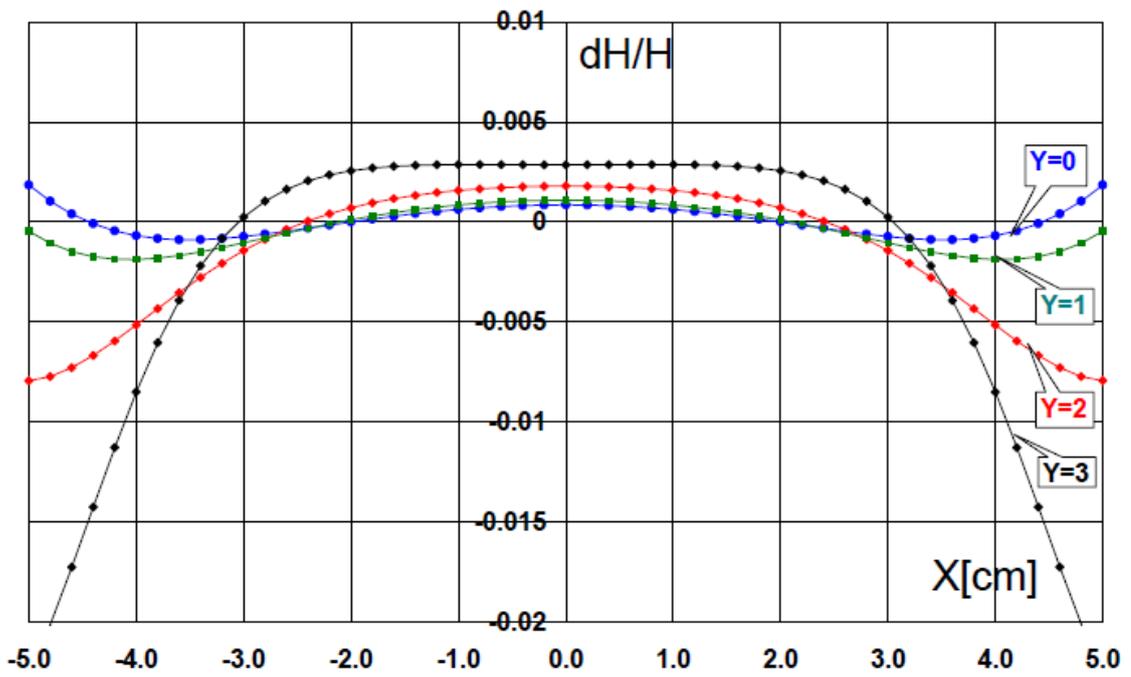


Рис. П.6.1.14. Неоднородность поля в центре корректора в области $X = \pm 50$ мм

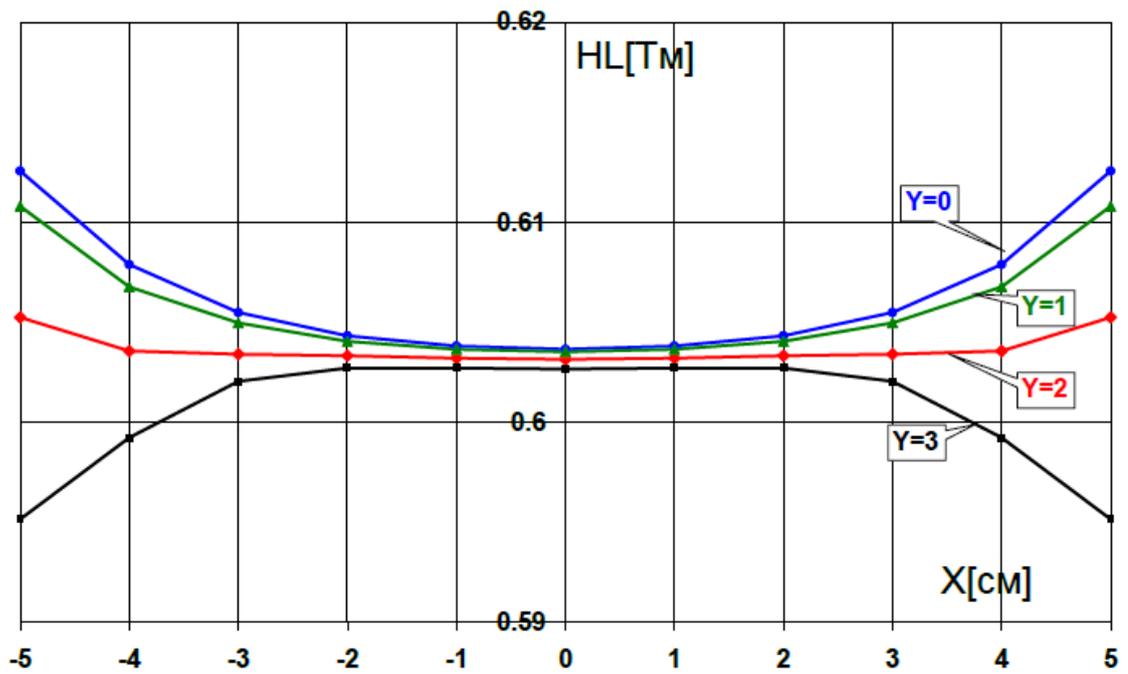


Рис. П.6.1.15. Распределение интеграла поля по радиусу, для разных Y

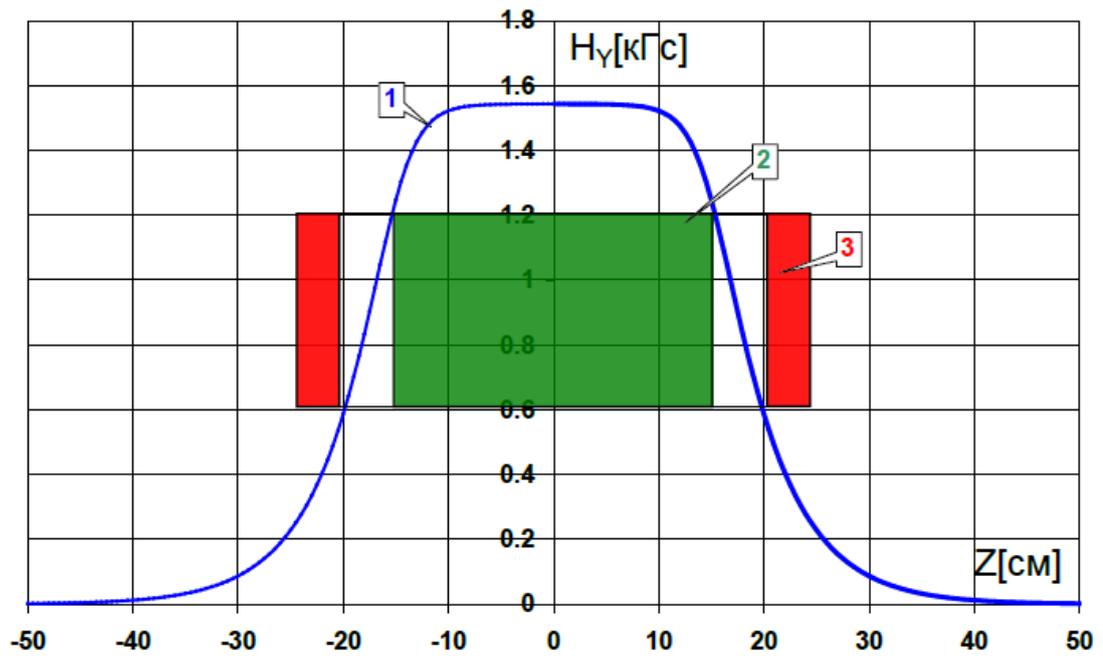


Рис. П.6.1.16. Распределение поля вдоль корректора. 1 — поле, 2 — магнитопровод 3 — обмотка возбуждения

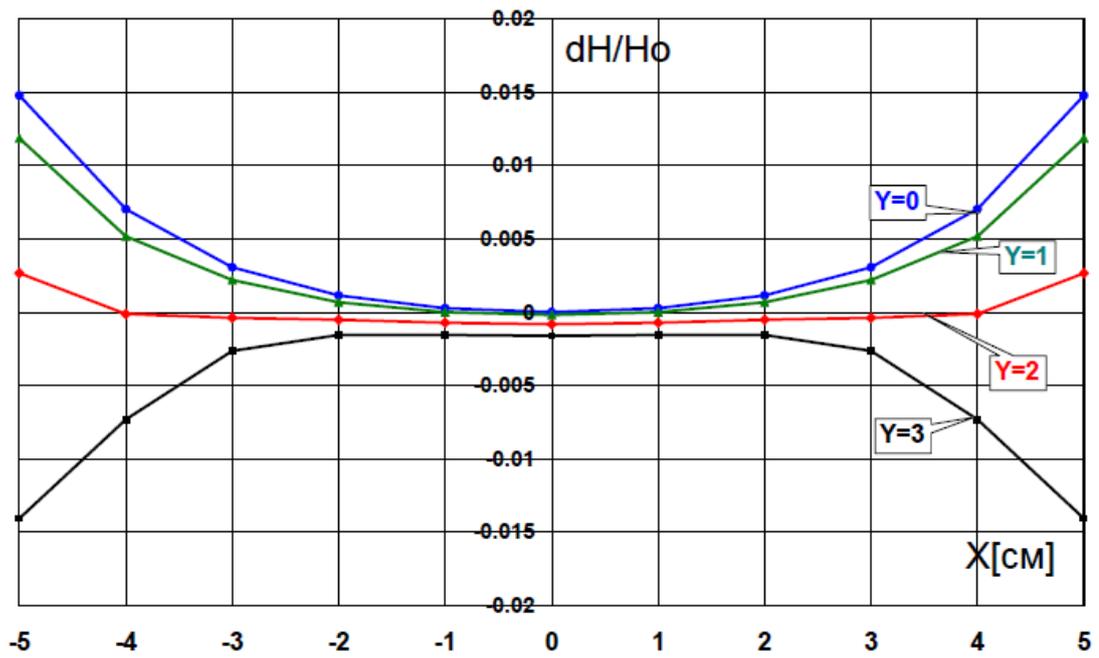


Рис. П.6.1.17. Неоднородность интеграла поля в корректоре по радиусу

Приложение 2

к Главе 6

П.6.2 ПОДАВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ В КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ НУКЛОТРОН — КОЛЛАЙДЕР

П.6.2.1 Вариант 1

В головной части канала (см. Рис. П.6.2.1) пучок поднимается из туннеля Нуклотрона в медианную плоскость колец Коллайдера на отметку +1,500 м. Ионно-оптическая система головной части настраивается на минимизацию вертикального дисперсионного инварианта, что является критичным для данного метода подавления дисперсии. В ветвях канала устанавливаются по одной согласующей секции вертикального переноса в виде пары вертикальных дипольных магнитов (см. Рис. П.6.2.2), переводящих пучок в плоскость принимающего кольца Коллайдера (на отметку +1,340 м или +1,660 м). Подавление вертикальной дисперсии достигается путём подбора набега фазы вертикальных бетатронных колебаний внутри согласующей секции, для чего требуются малые значения вертикальной бета-функции.

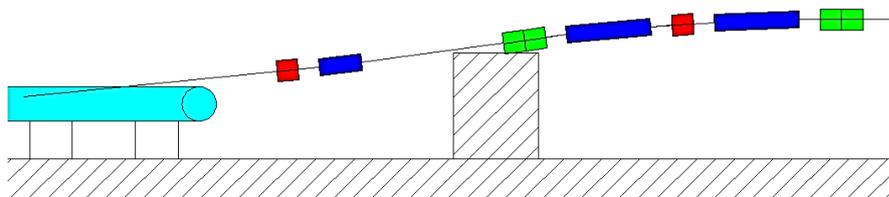


Рис. П.6.2.1. Головная часть канала (вариант 1)

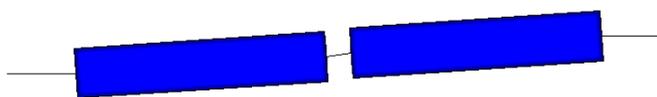


Рис. П.6.2.2. Согласующая секция вертикального переноса (вариант 1)

П.6.2.2 Вариант 2

В головной части канала (см. Рис. П.6.2.3) пучок поднимается из туннеля Нуклотрона в горизонтальную плоскость на 0,84 м ниже плоскости принимающего кольца Коллайдера (на отметку +0,500 м или +0,820 м). При этом разветвление канала осуществляется по вертикали. Ионно-оптическая система головной части настраивается на минимизацию вертикального дисперсионного инварианта. В ветвях канала устанавливаются по одной согласующей секции вертикального переноса в виде пары вертикальных дипольных магнитов с дуплетом линз (см. Рис. П.6.2.4), переводящих пучок в плоскость принимающего кольца Коллайдера (на отметку +1,340 м или +1,660 м). Подавление вертикальной дисперсии достигается путём подбора набега фазы вертикальных бетатронных колебаний внутри согласующей секции, для чего требуются настройки квадрупольных линз секции и малые значения вертикальной бета-функции в ней.

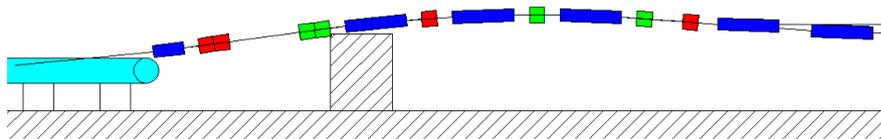


Рис. П.6.2.3. Головная часть канала (вариант 2)

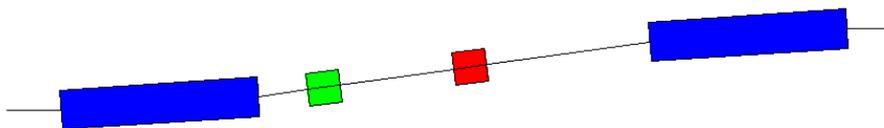


Рис. П.6.2.4. Согласующая секция вертикального переноса (вариант 2)

П.6.2.3 Вариант 3

В головной части канала (см. Рис. П.6.2.5) пучок поднимается из туннеля Нуклотрона в медианную плоскость колец Коллайдера на отметку +1,500 м. При этом минимизация вертикального дисперсионного инварианта в головной части канала не обязательна. В ветвях канала устанавливаются по две согласующих секции вертикального переноса в виде двух пар вертикальных дипольных магнитов с дуплетами квадрупольных линз (см. Рис. П.6.2.6), переводящие пучок сначала на отметку +0,500 м, а затем в плоскость принимающего кольца Коллайдера (на отметку +1,340 м или +1,660 м). Подавление вертикальной дисперсии достигается путём подбора набег фазы вертикальных бетатронных колебаний на участке между согласующими секциями (включая сами согласующие секции), для чего требуется настройка квадрупольных линз данного участка.

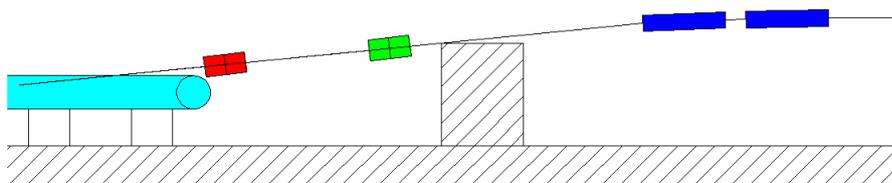


Рис. П.6.2.5. Головная часть канала (вариант 3)

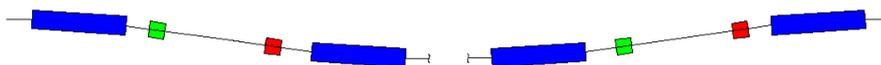


Рис. П.6.2.6. Согласующая секция вертикального переноса (вариант 3)

Приложение 3 к Главе 6

П.6.3 ДИНАМИКА ИОННЫХ ПУЧКОВ В КАНАЛЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ НУКЛОТРОН — КОЛЛАЙДЕР

В Таблице П.6.3.1 приведены параметры пучка на входе и выходе канала транспортировки. Знаки горизонтальной дисперсии соответствуют следующим направлениям оси Ox : на входе канала — внутрь кольца Нуклотрона; на выходе южной ветви канала — наружу кольца Коллайдера; на выходе северной ветви канала — внутрь кольца Коллайдера.

Таблица П.6.3.1. Параметры пучка на входе и выходе канала транспортировки Нуклотрон — Коллайдер

	вход канала	выход канала
$\beta_x, \text{ м}$	12,3	20
α_x	-2	2
$\beta_y, \text{ м}$	3,3	3,5
α_y	0,6	-0,5
$D_x, \text{ м}$	-2,9	3 (южная ветвь)/-3 (северная ветвь)
D'_x	-0,31	-0,3 (южная ветвь)/0,3 (северная ветвь)
$D_y, \text{ м}$	-0,17	0
D'_y	-0,1	0

Ниже приведены результаты моделирования динамики пучка для одного из рассмотренных вариантов магнитной структуры канала. На Рис. П.6.3.1 и Рис. П.6.3.2 даны бета-функции и дисперсии пучка при переводе по южной ветви канала в верхнее кольцо Коллайдера. На Рис. П.6.3.3 и Рис. П.6.3.4 даны бета-функции и дисперсии пучка при переводе по северной ветви канала в нижнее кольцо Коллайдера.

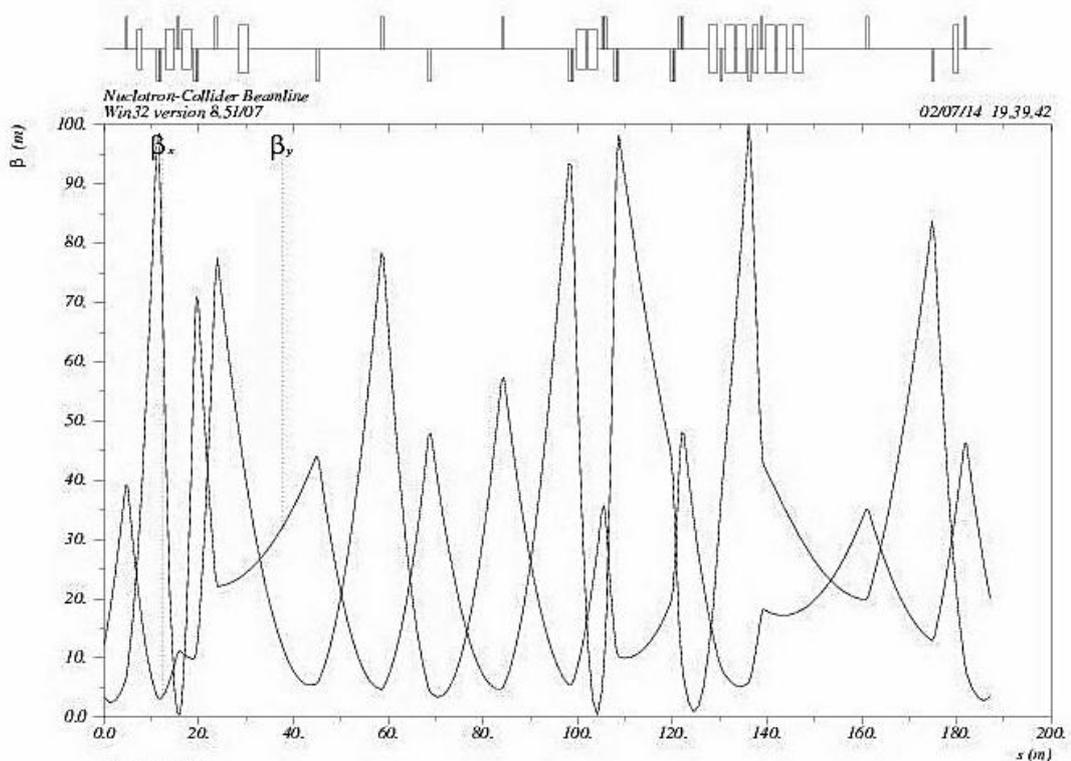


Рис. П.6.3.1. Бета-функции пучка в южной ветви канала

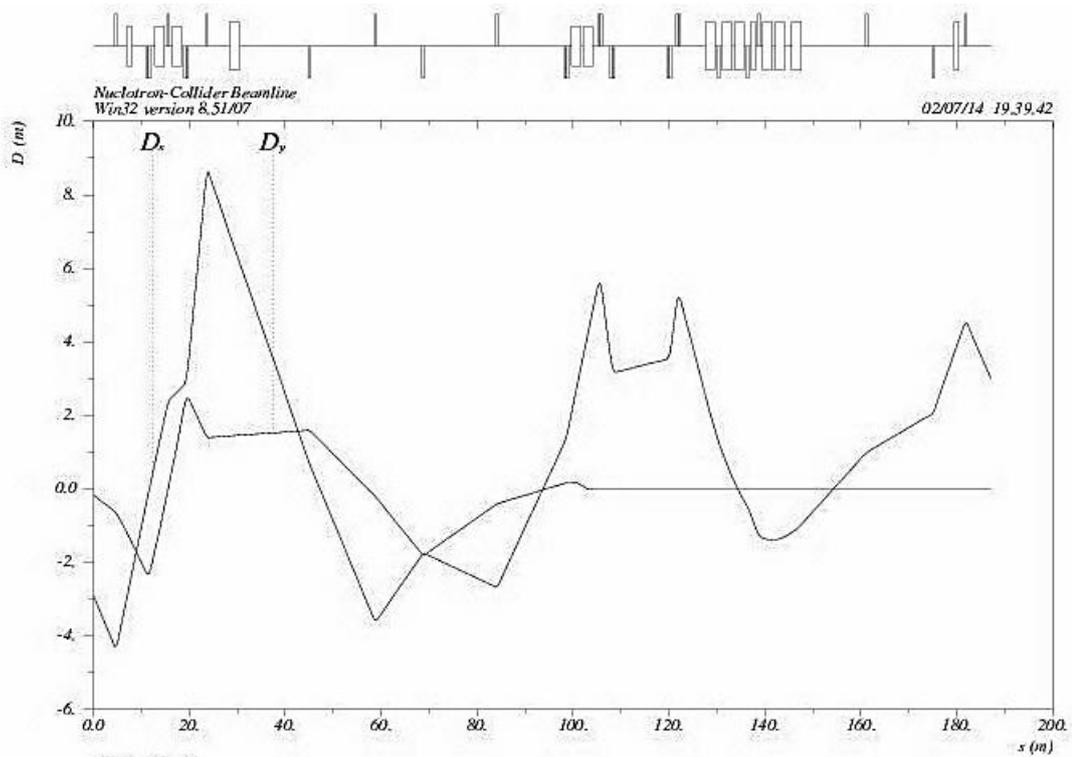


Рис. П.6.3.2. Дисперсионные функции пучка в южной ветви канала

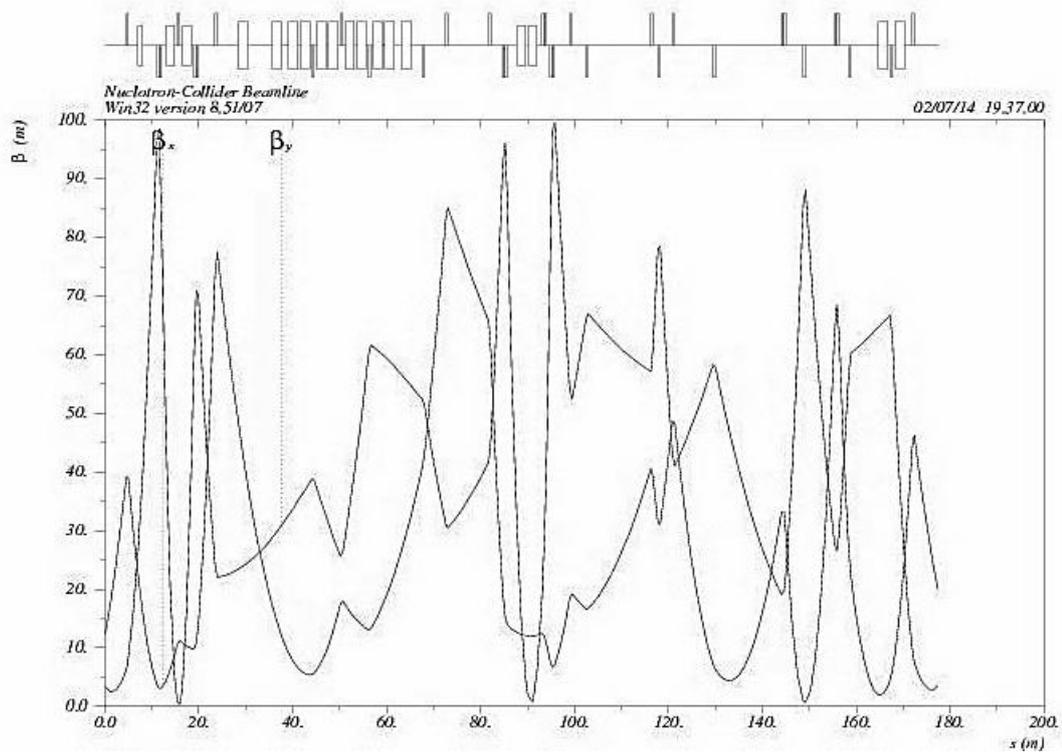


Рис. П.6.3.3. Бета-функции пучка в северной ветви канала

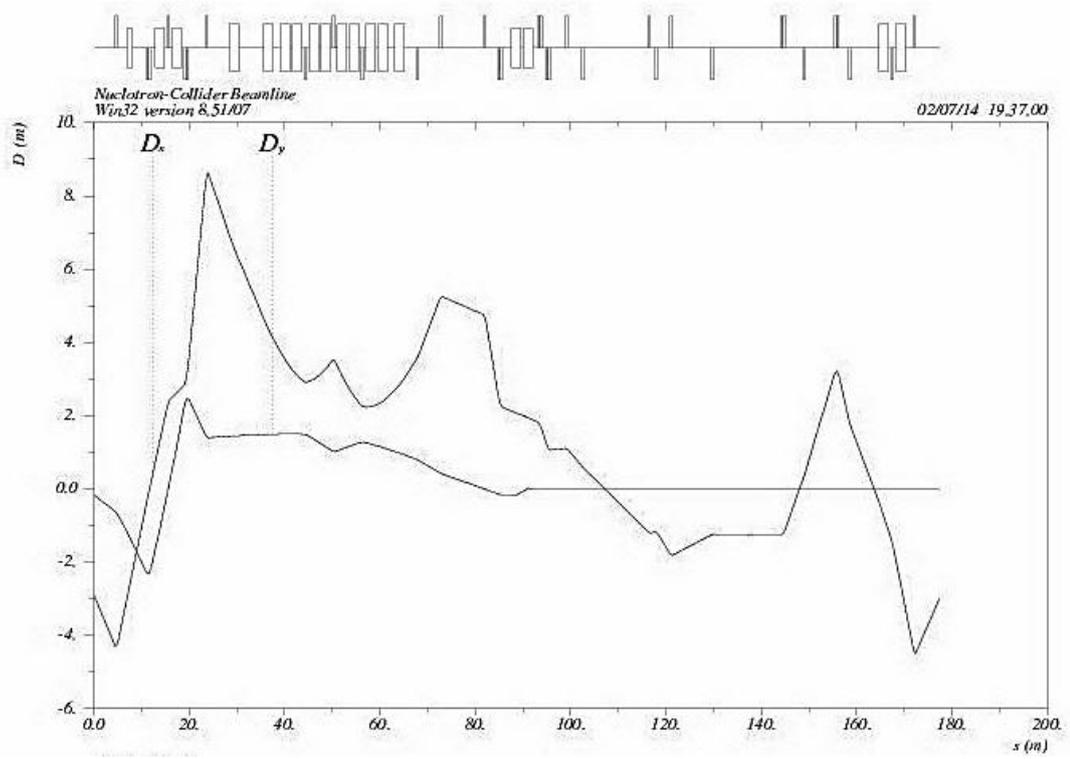


Рис. П.6.3.4. Дисперсионные функции пучка в северной ветви канала

Приложение 4 к Главе 6

П.6.4 МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

П.6.4.1 Дипольные магниты

Дипольный магнит прямой с параллельными краями. Ядро магнита составлено из двух половинок сердечника и двух катушек (верхней и нижней). Половинки сердечника сделаны из склеенных, отштампованных с высокой точностью листов. Катушки намотаны полым медным проводником, изолированным лентой из стеклоткани, и пропитаны радиационно-стойким эпоксидным компаундом. Две половинки сердечника можно свободно разъединить между собой, позволив выполнить монтаж вакуумной камеры и замену катушек.

Поперечное сечение магнита типа «оконная рама» представлено на Рис. П.6.4.1. Внешний вид магнита на подставке приведён на Рис. П.6.4.2.

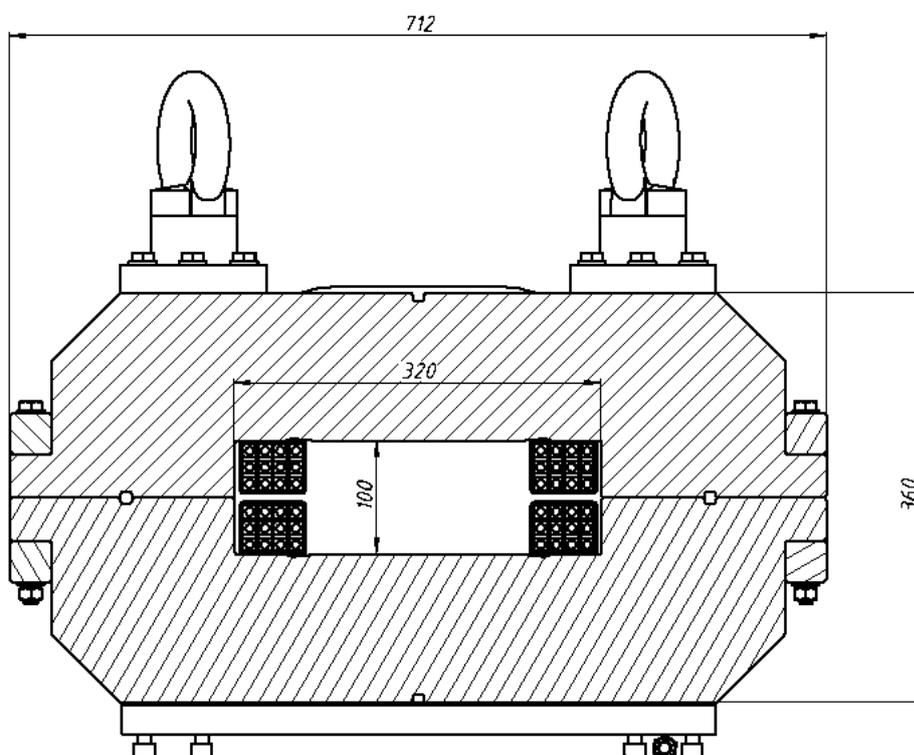


Рис. П.6.4.1. Поперечное сечение дипольного магнита

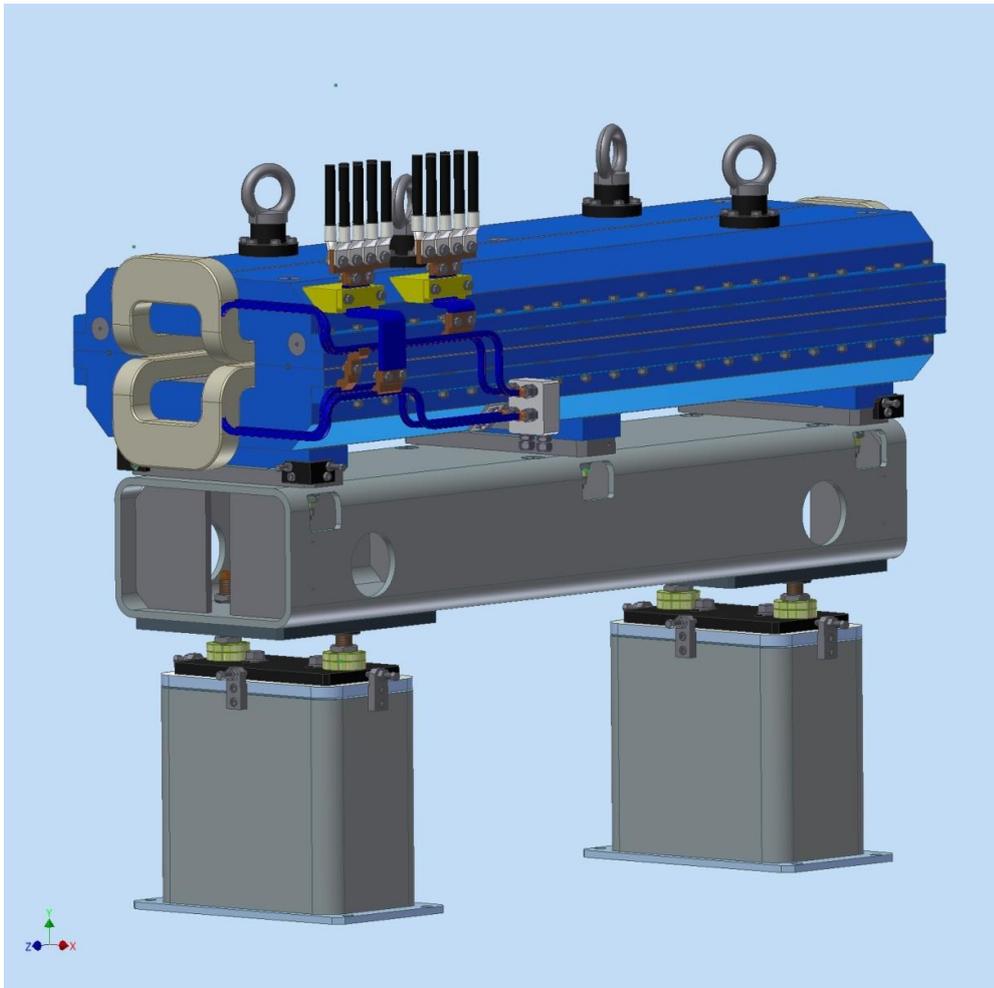


Рис. П.6.4.2. Внешний вид магнита на подставке

Качество поля обеспечивается заданными жёсткими допусками на профиль полюса, на точность сборки магнита, и на качество стали.

Основные параметры магнита приведены в Таблице П.6.4.1.

Таблица П.6.4.1. Основные параметры дипольного магнита

Параметр	Единица измерения	Значение
Основные параметры		
Номинальное магнитное поле	Т	1,5
Магнитный зазор	мм	100
Эффективная длина	мм	2000
Угол поворота (при $B\rho = 45$ Т·м)	рад	0,0667
Качество поля		
Интеграл поля вдоль траектории $\int Bdl$	Т·м	3
Горизонтальный размер области хорошего поля	мм	± 65
Вертикальный размер области хорошего поля	мм	± 40
Качество интеграла поля $\Delta \int Bdl / \int Bdl$		$\leq \pm 5 \cdot 10^{-4}$
Электрические параметры		
Число витков обмотки возбуждения на полюс		12
Число обмоток		2
Медная шинка обмотки возбуждения	мм ²	11,5 × 11,5
Диаметр отверстия	мм	7,5
Амплитуда тока I_{max}	А	5000
Сопротивление обмотки при 20 °С	Ом	0,025
Индуктивность магнита	Гн	0,0037
Длительность импульса	сек	0,042
Частота повторения импульсов	Гц	0,25
Эффективный ток I_{eff}	А	360
Падение напряжения U_{nom}	В	1400
Энергия, запасённая в поле	Дж	46000
Средняя рассеиваемая мощность при I_{max}	Вт	3300
Охлаждение водяное		
Количество контуров охлаждения		2
Перепад давления	кг/см ²	3
Перепад температуры воды при I_{max}	°С	6
Полный расход воды	л/мин	9
Массогабаритные характеристики		
Длина сердечника	мм	1965
Полная длина магнита	мм	2100
Полная ширина магнита	мм	712
Полная высота магнита	мм	360
Вес меди	кг	110
Вес магнита в сборе	кг	3350

П.6.4.2 Квадрупольные линзы

Ярмо квадрупольной линзы составлено из двух частей и четырёх включённых последовательно катушек. Каждый из двух сердечников сделан из склеенных, отштампованных с высокой точностью листов толщиной 1 мм. Катушки намотаны полым медным проводником 8×8 мм² Ø5, изолированным лентой из стеклоткани, и пропитаны радиационно-стойким эпоксидным компаундом. Половинки сердечника могут свободно разъединяться между собой, позволяя выполнить монтаж вакуумной камеры и замену катушек.

Качество поля обеспечивается заданными жёсткими допусками на профиль полюса, на точность сборки магнита и на качество стали. Окончательная коррекция магнитной длины и качества поля

будет производиться путём подбора профиля краёв полюса (концевые фаски) во время магнитных измерений.

Поперечное сечение квадрупольной линзы представлено на Рис. П.6.4.3. Внешний вид линзы приведён на Рис. П.6.4.4.

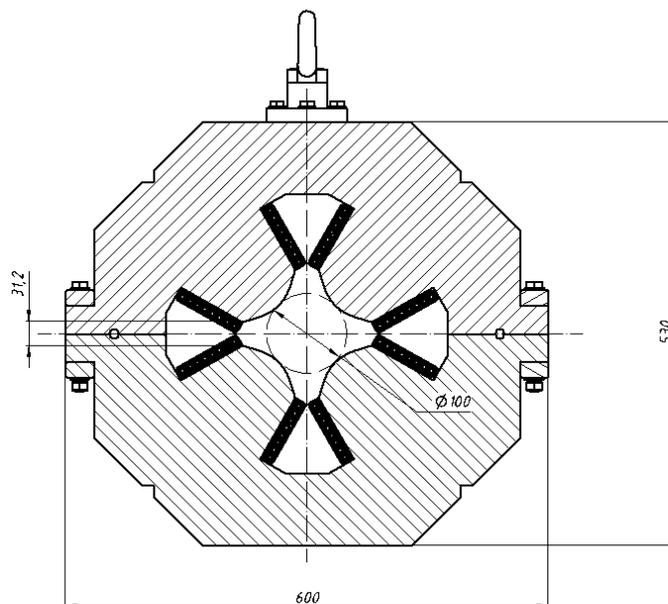


Рис. П.6.4.3. Поперечное сечение квадрупольной линзы

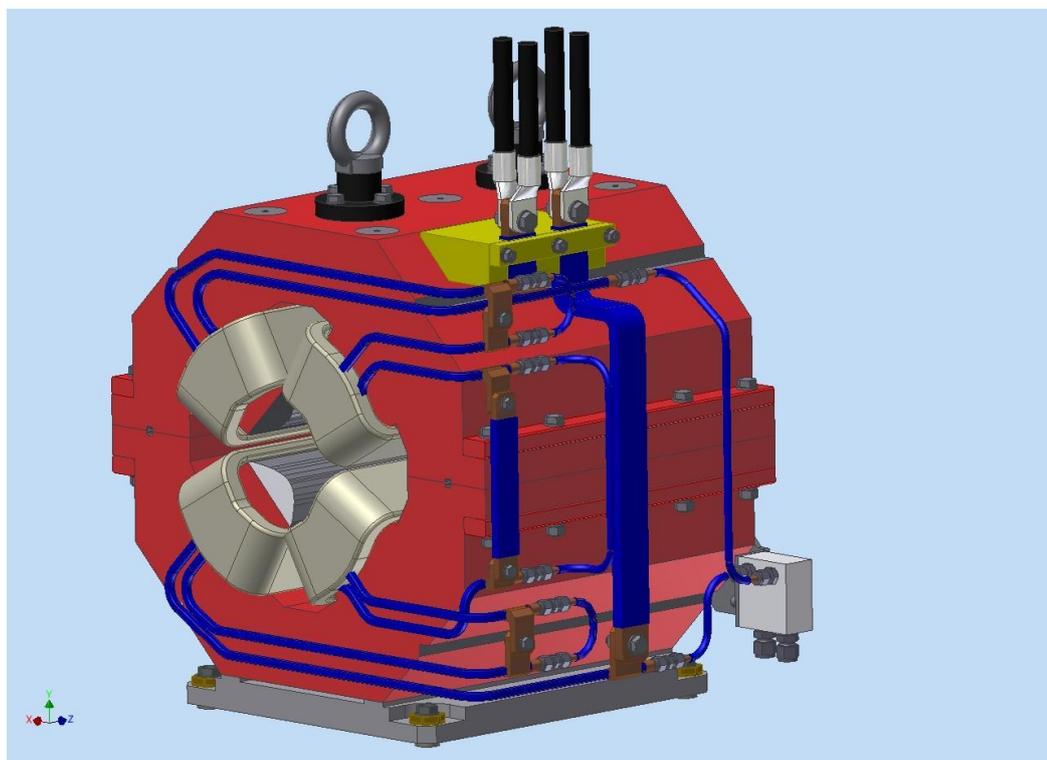


Рис. П.6.4.4. Внешний вид линзы

Основные параметры линзы приведены в Таблице П.6.4.2.

Таблица Рис. П.6.4.2. Основные параметры квадрупольной линзы

Параметр	Единица измерения	Значение
Основные параметры		
Градиент магнитного поля	Т/м	20
Вписанный диаметр	мм	100
Эффективная длина	мм	500
Качество поля		
Интеграл градиента поля вдоль траектории $fGdl$	Т	10
Радиус области хорошего поля	мм	40
Качество интеграла поля $\Delta fGdl/fGdl$		$\leq \pm 1 \cdot 10^{-3}$
Электрические параметры		
Число витков обмотки возбуждения на полюс		8
Число обмоток		4
Медная шинка обмотки возбуждения	мм ²	8 × 8
Диаметр отверстия	мм	5
Амплитуда тока I_{max}	А	2600
Сопротивление обмотки при 20 °С	Ом	0,0015
Индуктивность линзы	Гн	0,00145
Длительность импульса	сек	0,01
Частота повторения импульсов	Гц	0,25
Эффективный ток I_{eff}	А	95
Падение напряжения U_{nom}	В	1250
Энергия, запасённая в поле	Дж	5000
Средняя рассеиваемая мощность при I_{max}	Вт	135
Охлаждение водяное		
Количество контуров охлаждения		1
Перепад давления	кг/см ²	2
Перепад температуры воды при I_{max}	°С	1,5
Полный расход воды	л/мин	1,5
Массогабаритные характеристики		
Длина сердечника	мм	450
Полная длина линзы	мм	550
Полная ширина линзы	мм	600
Полная высота линзы	мм	530
Вес меди	кг	24
Вес линзы в сборе	кг	850

П.6.4.3 Дипольные корректоры

Ярмо корректора составлено из двух С-образных половинок, имеющих плоскость разъёма в медианной плоскости. Каждая половинка магнитопровода набирается из штампованных пластин толщиной 1 мм, имеющих клеевое покрытие, и затем склеивается по специальной технологии. Две катушки охватывают магнитопровод по бокам. Каждая катушка намотана сплошным, изолированным медным проводником. Катушки пропитаны радиационно-стойким эпоксидным компаундом. Половинки сердечника свободно разъединяются между собой, позволяя выполнить монтаж вакуумной камеры и замену катушек.

Поперечное сечение корректора представлено на Рис. П.6.4.5. Внешний вид горизонтального корректора приведён на Рис. П.6.4.6. Для коррекции по вертикали магнит разворачивается на 90°.

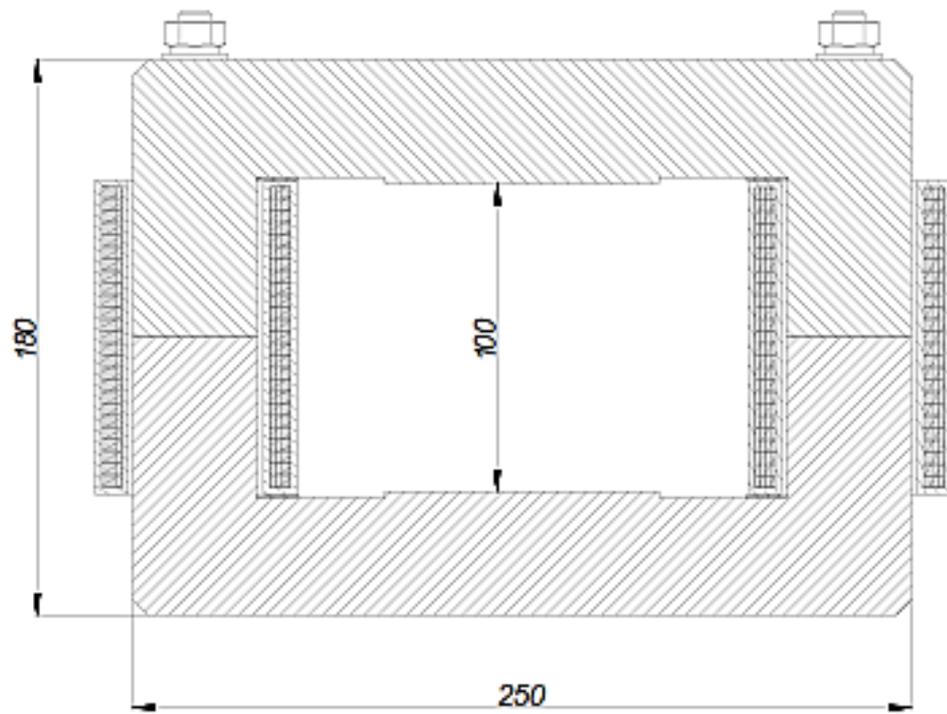


Рис. П.6.4.5. Поперечное сечение корректора

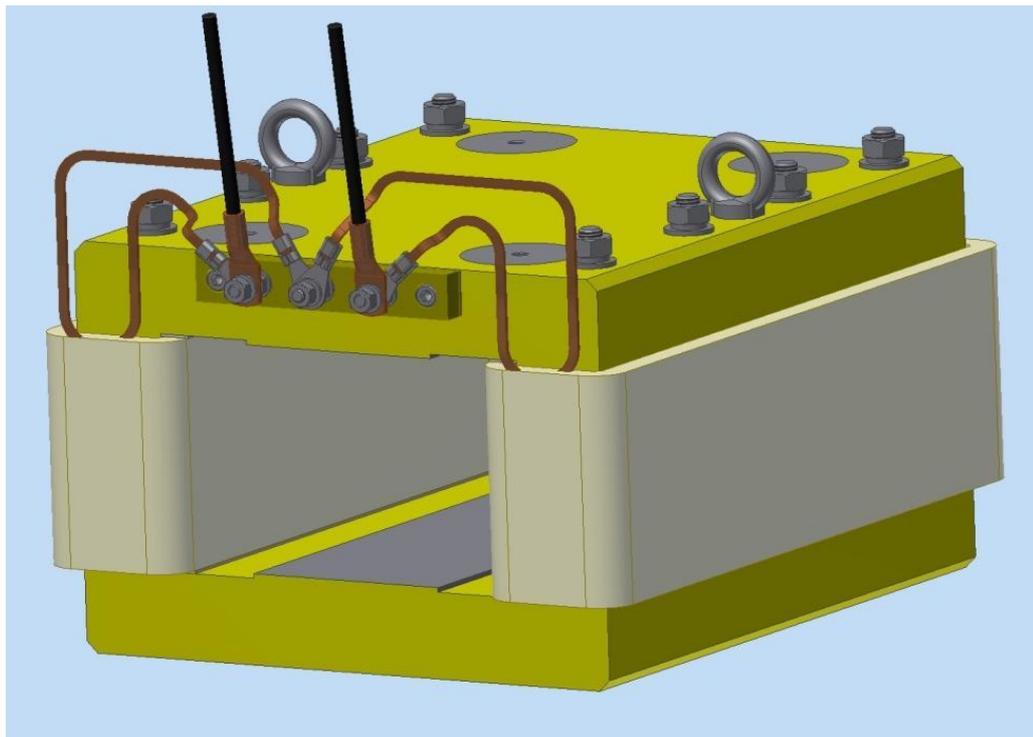


Рис. П.6.4.6. Внешний вид корректора

Основные параметры корректора приведены в Таблице П.6.4.3.

Таблица П.6.4.3. Основные параметры дипольного корректора

Параметр	Единица измерения	Значение
Основные параметры		
Номинальное магнитное поле	Т	0,154
Магнитный зазор	мм	100
Эффективная длина	мм	390
Угол поворота (при $B\rho = 45 \text{ Т}\cdot\text{м}$)	рад	0,0013
Качество поля		
Интеграл поля вдоль траектории $\int Bdl$	Т·м	0,06
Горизонтальный размер области хорошего поля	мм	± 50
Вертикальный размер области хорошего поля	мм	± 40
Качество интеграла поля $\Delta \int Bdl / \int Bdl$		$\leq \pm 1 \cdot 10^{-2}$
Электрические параметры		
Число витков обмотки возбуждения на полюс		100
Число обмоток		2
Медная шинка обмотки возбуждения	мм ²	$3,55 \times 1,25$
Амплитуда тока I_{max}	А	125
Сопротивление обмотки при 20°C	Ом	0,77
Индуктивность магнита	Гн	0,008
Длительность импульса	сек	0,005
Частота повторения импульсов	Гц	0,25
Эффективный ток I_{eff}	А	3,1
Падение напряжения U_{nom}	В	650
Энергия, запасённая в поле	Дж	65
Средняя рассеиваемая мощность при I_{max}	Вт	10
Охлаждение воздушное		
Массогабаритные характеристики		
Длина сердечника	мм	300
Полная длина магнита	мм	350
Полная ширина магнита	мм	260
Полная высота магнита	мм	180
Вес меди	кг	7
Вес магнита в сборе	кг	73

Приложение 5 к Главе 6

П.6.5 СИСТЕМА ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

П.6.5.1 Шкафы питания дипольных магнитов

Шкафы питания дипольных магнитов служат для размещения импульсных источников питания. Один шкаф питания обеспечивает работу одного дипольного магнита.

Шкаф питания дипольного магнита содержит:

- Импульсный Генератор;
- узел электроники и устройств блокировки и сигнализации (УБС);
- систему охлаждения.

Импульсный Генератор состоит из зарядного устройства, конденсаторной батареи и коммутатора.

Зарядное устройство (зарядный инвертор) предназначено для зарядки конденсаторной батареи Импульсного Генератора. В промежутках между импульсами Генератора инвертор должен обеспечивать дозарядку ёмкостей до номинального напряжения и удерживать это напряжение с заданной точностью. Зарядный инвертор выполнен в виде отдельного полноразмерного 19" блока стандарта «Евромеханика» высотой 3U и глубиной ~ 350 мм.

Зарядный инвертор построен по схеме источника квазипостоянного (пульсирующего с постоянным средним значением) тока. Инвертор питается от трёхфазной сети переменного тока 380/220 В, 50 Гц. Максимальная выходная мощность составляет 6 кВт.

Основные параметры зарядного инвертора приведены в Таблице П.6.5.1.

Таблица П.6.5.1. Основные параметры зарядного инвертора

Параметр	Единица измерения	Значение
Выходное напряжение	В	0 ÷ 1500
Выходной ток	А	4
Частота преобразования	кГц	25
Погрешность стабилизации $\Delta U/U$	%	0,01
КПД	%	> 90

Конденсаторная батарея Импульсного Генератора должна максимально накапливать более 50 кДж. Батарея базируется на конденсаторах завода «ЭЛКОД» (типы К 75-88 и К 75-100). Батарея содержит 9 ÷ 10 конденсаторов.

Коммутатор представляет собой мост, образованный чётной и нечётной парами тиристоров. Для коммутатора предполагается использовать тиристоры одного из следующих типов: Т173-1600

(Саранского завода ОАО «Электровыпрямитель») или Т473-1600 (Таллиннского завода Estel). На коммутатор устанавливается радиатор воздушного охлаждения.

Узел электроники и УБС предназначен для контроля и управления параметрами Импульсного Генератора, а также обеспечения безопасности обслуживания шкафа питания. Узел включает в себя электронику, ответственную за выполнение следующих задач контроля и управления:

- генерация стартового импульса коммутации конденсаторной батареи на нагрузку;
- формирование опорного сигнала для устройства стабилизации напряжения на конденсаторной батарее;
- измерение напряжения на конденсаторной батарее;
- измерение дополнительных сигналов для дистанционной диагностики состояния Генератора;
- измерение значений магнитного поля в дипольном магните.
- Устройства блокировки и сигнализации включают в себя:
 - автоматический землитель, закорачивающий конденсаторную батарею через сильноточные резисторы;
 - РМБ — устройство для закорачивания конденсаторной батареи после снятия с неё заряда через автоматический землитель;
 - механическое реле времени, запрещающее поворот штурвала привода РМБ даже при исчезновении электропитания шкафа.
- Охлаждение шкафа питания воздушное. Система охлаждения состоит из вентиляторов.

Шкафы питания дипольных магнитов выполнены в конструктивном стандарте VARISTAR высотой 2000 мм с поперечными размерами 1200 × 1200 мм². В нижней части шкафа в два этажа размещается конденсаторная батарея. Над конденсаторной батареей располагается тиристорный мост с радиаторами воздушного охлаждения и узел управляющей электроники и УБС. Конструктивно узел представляет собой несколько шасси (крейтов или корзин) с управляющей электроникой и набор устройств УБС. Крейты с электроникой тщательно экранированы для защиты от помех, создаваемых элементами силового (выходного) контура Генератора при коммутации тока дипольного магнита. Для обеспечения безопасности эксплуатации двери шкафа запираются специальным ключом, позволяющим запускать автоматику выключения и открывания двери.

Виды спереди и сзади шкафа питания дипольного магнита представлены на Рис. П.6.5.1 (примечание: на рисунке показан шкаф с отличными от указанных выше поперечными габаритами). Виды сверху представлены на Рис. П.6.5.2. Вид узла электроники и УБС представлен на Рис. П.6.5.3.

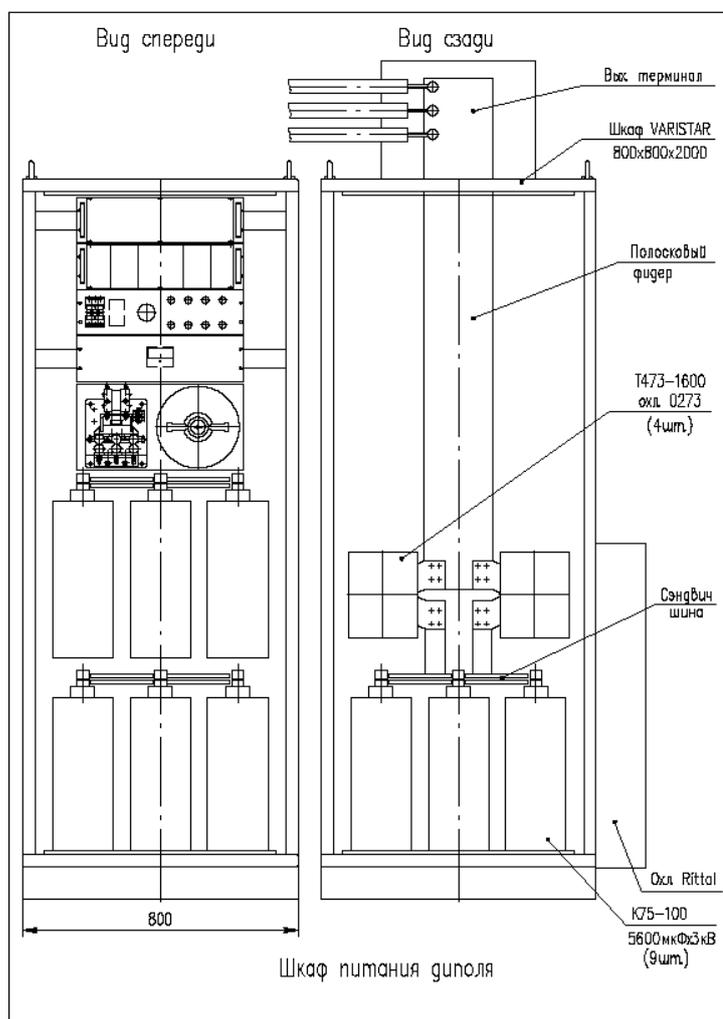


Рис. П.6.5.1. Шкаф питания дипольного магнита. Виды спереди и сзади

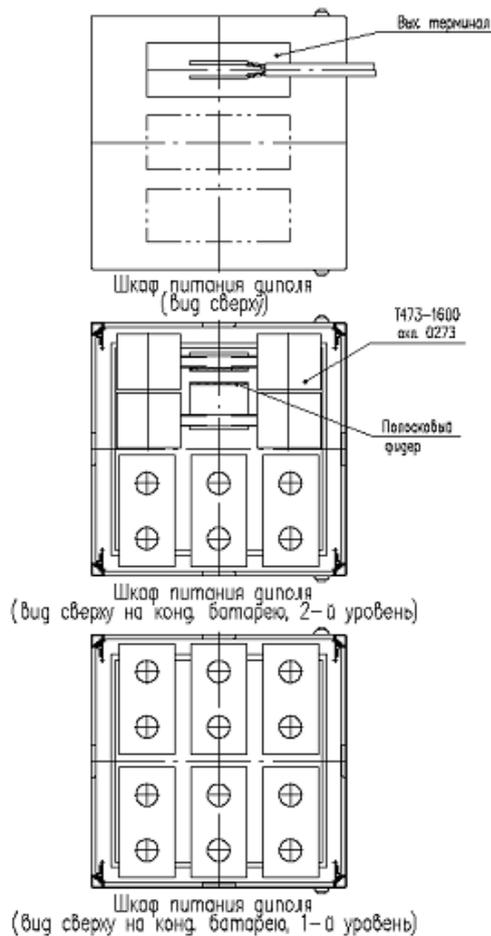


Рис. П.6.5.2. Шкаф питания дипольного магнита. Виды сверху

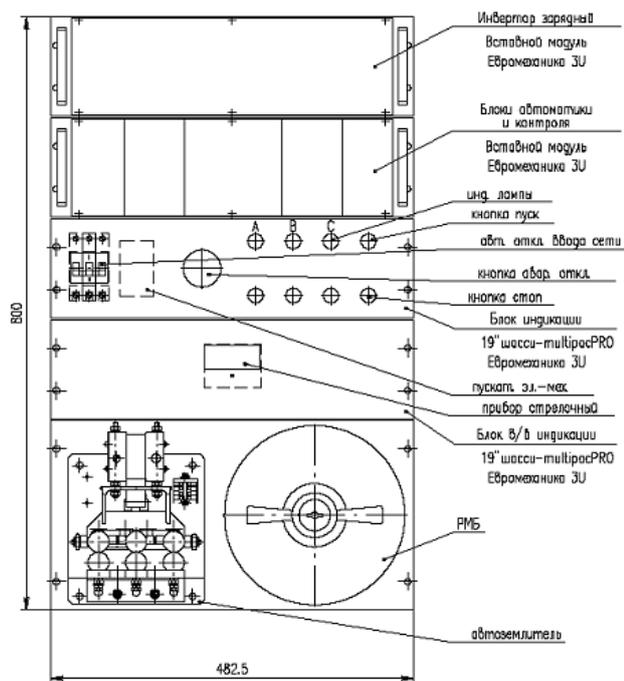


Рис. П.6.5.3. Узел электроники и УБС

Основные параметры шкафа питания дипольного магнита (включая параметры Импульсного Генератора) приведены в Таблице П.6.5.2.

Таблица П.6.5.2. Основные параметры шкафа питания дипольного магнита

Параметр	Единица измерения	Значение
Габарит шкафа	мм ³	1200 × 1200 × 2000
Вес Генератора	кг	1500
Энергоёмкость нагрузки	Дж	46250
Индуктивность	Гн	0,0037
Амплитуда тока	А	5000
Сопrotивление нагрузки при 20°C	Ом	0,025
Сопrotивление кабельной трассы до самой удалённой нагрузки	Ом	0,0066
Рассеиваемая мощность в нагрузке	Вт	3300
Рассеиваемая мощность в кабельной трассе	Вт	890
Рассеиваемая мощность в железе	Вт	56
Ёмкость конденсаторной батареи Генератора	мкФ	56000
Амплитуда зарядного напряжения	В	1400
Остаточное напряжение на батарее после срабатывания Генератора	В	1216
Максимальная энергоёмкость батареи	Дж	55000
Длительность полусинусоиды тока	сек	0,0462
Энергия, уносимая нагрузкой и элементами Генератора за один импульс	Дж	13500
Активные потери в батарее	Вт	300 ÷ 1500
Активные потери в коммутаторе	Вт	180
Активные потери в кабельной трассе	Вт	890
Средняя мощность зарядного устройства	Вт	4000 ÷ 6000
Амплитуда напряжения зарядного устройства	В	1500
Средний ток зарядного устройства	А	2 ÷ 4
Мощность, выделяемая внутри шкафа	Вт	до 2000
Средняя мощность, потребляемая от сети	Вт	до 4000

П.6.5.2 Шкафы питания квадрупольных линз

Шкафы питания квадрупольных линз служат для размещения импульсных источников питания. Один шкаф питания обеспечивает работу одной квадрупольной линзы.

Шкаф питания квадрупольной линзы содержит:

- Импульсный Генератор;
- узел электроники и устройств блокировки и сигнализации (УБС);
- систему охлаждения.

Импульсный Генератор состоит из зарядного инвертора, конденсаторной батареи и коммутатора.

Зарядный инвертор аналогичен зарядному устройству Импульсного Генератора дипольного магнита. Инвертор питается от трёхфазной сети переменного тока 380/220 В, 50 Гц. Максимальная выходная мощность составляет 400 Вт.

Конденсаторная батарея должна максимально накапливать более 5 кДж. Батарея базируется на конденсаторах завода «ЭЛКОД» (типы К 75-88 и К 75-100). Батарея содержит от 1 до 3 конденсаторов.

Коммутатор аналогичен тиристорному мосту Импульсного Генератора дипольного магнита. На коммутатор устанавливается радиатор воздушного охлаждения.

Узел электроники и УБС аналогичен узлу электроники и УБС шкафа питания дипольного магнита.

Охлаждение шкафа питания воздушное. Система охлаждения состоит из вентиляторов.

Шкафы питания выполнены в конструктивном стандарте VARISTAR высотой 2000 мм с поперечными размерами 800 × 600 мм². В нижней части шкафа размещается конденсаторная батарея. Над конденсаторной батареей располагается тиристорный мост и узел электроники и УБС. Двери шкафа запираются специальным ключом, позволяющим запускать автоматику выключения и открывания двери.

Виды спереди и сзади шкафа питания дипольного магнита представлены на Рис. П.6.5.4.

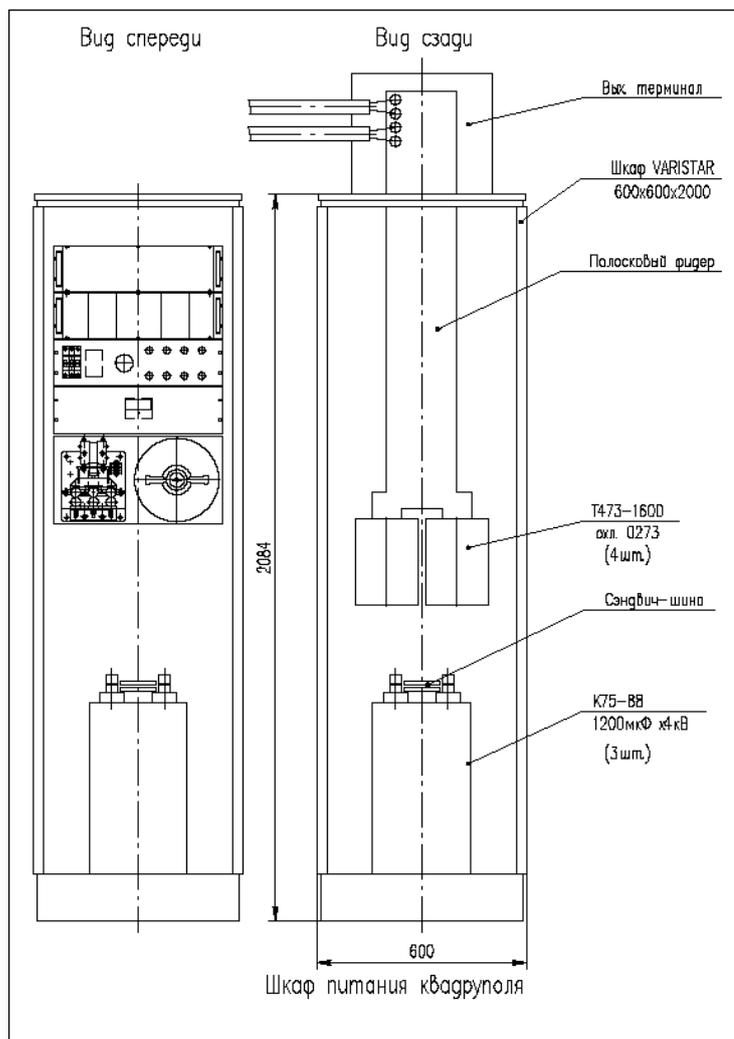


Рис. П.6.5.4. Шкаф питания квадрупольной линзы

Основные параметры шкафа питания квадрупольной линзы (включая параметры Импульсного Генератора) приведены в Таблице П.6.5.3.

Таблица П.6.5.3. Основные параметры шкафа питания квадрупольной линзы

Параметр	Единица измерения	Значение
Габарит шкафа	мм ³	800 × 600 × 2000
Вес Генератора	кг	250
Энергоёмкость нагрузки	Дж	4900
Индуктивность	Гн	0,00145
Амплитуда тока	А	2600
Сопротивление нагрузки при 20 °С	Ом	0,02
Сопротивление кабельной трассы до самой удалённой нагрузки	Ом	0,01
Рассеиваемая мощность в нагрузке	Вт	164
Рассеиваемая мощность в кабельной трассе	Вт	82
Рассеиваемая мощность в железе	Вт	15
Ёмкость конденсаторной батареи Генератора	мкФ	5600
Амплитуда зарядного напряжения	В	1400
Остаточное напряжение на батарее после срабатывания Генератора	В	1240
Максимальная энергоёмкость батареи	Дж	5500
Длительность полусинусоиды тока	с	0,01
Энергия, уносимая нагрузкой и элементами Генератора за один импульс	Дж	1140
Активные потери в батарее	Вт	30 ÷ 150
Активные потери в коммутаторе	Вт	21
Активные потери в кабельной трассе	Вт	82
Средняя мощность зарядного устройства	Вт	400
Амплитуда напряжения зарядного устройства	В	1500
Средний ток зарядного устройства	А	0,26
Мощность, выделяемая внутри шкафа	Вт	до 200
Средняя мощность, потребляемая от сети	Вт	до 500

П.6.5.3 Шкафы питания дипольных корректоров

Шкафы питания дипольных корректоров (корректирующих магнитов) служат для размещения импульсных источников питания. Один шкаф питания обеспечивает работу от одного до восьми корректирующих магнитов.

Шкаф питания корректирующих магнитов содержит:

- Импульсные Генераторы;
- источники постоянного тока;
- систему охлаждения.

Импульсный Генератор состоит из накопительного конденсатора ёмкостью 300 мкФ, тиристорного ключа, коммутирующего ёмкость на нагрузку и схему прецизионной зарядки ёмкости. Генератор выполнен в виде вставного закрытого блока стандарта «Евромеханика» и имеет высоту 3U (128 мм), ширину 42HP (212 мм) и глубину 230 мм.

Источники постоянного тока ~ 220 В/24 В служат для питания Импульсных Генераторов. Для каждого Генератора устанавливается один источник постоянного тока.

Охлаждение шкафа питания воздушное. Система охлаждения состоит из вентиляторов.

Шкафы питания выполнены в конструктивном стандарте VARISTAR высотой 2000 мм с поперечными размерами 800 × 600 мм². Внутри шкафа попарно размещаются Импульсные Генераторы и источники постоянного тока.

Основные параметры шкафа питания корректирующих магнитов (включая параметры Импульсного Генератора) приведены в Таблице П.6.5.4.

Таблица П.6.5.4. Основные параметры шкафа питания корректирующих магнитов

Параметр	Единица измерения	Значение
Габарит шкафа	мм ³	800 × 600 × 2000
Вес одного Генератора	кг	200
Энергоёмкость нагрузки	Дж	70
Индуктивность	Гн	0,008
Амплитуда тока	А	125
Сопротивление нагрузки при 20 °С	Ом	0,77
Рассеиваемая мощность в нагрузке	Вт	10
Напряжение питания DC	В	24
Потребляемый ток	А	не более 2
Ёмкость накопителя Генератора	мкФ	300
Диапазон рабочих напряжений накопителя	В	15 ÷ 700
Рабочая частота преобразования	кГц	33
Длительность полусинусоиды тока	с	0,005
Частота повторения импульсов	Гц	0,25
Пульсации напряжения накопителя на рабочей частоте		< 7·10 ⁻⁵
Общая нестабильность напряжения накопителя		< 1·10 ⁻⁴
Средняя мощность, потребляемая от сети	Вт	до 200

Глава 7

Коллайдер

7.1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ПУЧКА, СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ

7.1.1 Введение

Новый ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), проектируемый и сооружаемый в настоящее время в ОИЯИ, предназначен для проведения экспериментов по ион-ионным и ион-протонным столкновениям в диапазоне кинетических энергий $1 \div 4,5$ ГэВ/н, а также столкновениям поляризованных протонов ($5 \div 12,6$ ГэВ/н) и дейтронов ($2 \div 5,8$ ГэВ/н) [7.1]. Основным режимом работы Коллайдера является столкновения ионов вплоть до Au при энергиях в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 4 \div 11$ ГэВ, когда ожидается образование ядерной материи при экстремальных значениях плотности и температуры. Разработанная оптическая структура Коллайдера с использованием двух систем охлаждения ионного пучка — электронной и стохастической и применение определённого сценария работы Коллайдерных колец позволяет достичь требуемую среднюю светимость в каждой из двух точек встречи порядка 10^{27} см⁻²·с⁻¹.

Кольца Коллайдера имеют максимальную магнитную жёсткость 45 Тл·м, которая соответствует максимально достижимой магнитной жёсткости Нуклотрона. Два кольца Коллайдера разделены вертикально (0,32 м — расстояние между осями пучков) и используют двухапертурные сверхпроводящие дипольные и квадрупольные магниты [7.2] за исключением двух областей сведения и взаимодействия пучков. Максимальное поле дипольных магнитов 1,8 Тл и максимальный градиент квадрупольных линз 23 Тл/м приняты для минимизации эффектов насыщения железного ярма магнитов [7.3]. Каждое из колец Коллайдера состоит из двух поворотных арок и двух длинных прямолинейных секций и представляет собой ускоритель типа racetrack с периметром 503 м, который равен двум периметрам Нуклотрона. Оптическая структура Коллайдера основана на периодической ячейке типа FODO в арке (12 ячеек в каждой арке). Данная структура показала своё преимущество перед другими структурами с точки зрения минимизации влияния внутривидового рассеяния (ВВР). В выбранной структуре время роста фазового объёма пучка из-за ВВР в несколько раз превышает время стохастического и электронного охлаждения. Кроме того, в этой структуре наиболее оптимальна схема инжекции в кольцо.

7.1.2 Оптическая структура кольца

Поворотная арка состоит из 12 периодических ячеек FODO. Набег фазы бетатронных колебаний на ячейку составляет 90°. Крайние 1,5 ячейки в каждой арке обеспечивают подавление горизонтальной дисперсии с помощью трех дополнительных семейств квадрупольных корректоров. Кроме того, в составе подавителя дисперсии целая ячейка FODO с пропущенными магнитами используется для эффективной инжекции пучка в горизонтальной плоскости. FODO-

ячейка длиной 12 м содержит 4 дипольных магнита (80 магнитов в кольце) длиной 1,94 м и 2 квадрупольные линзы с эффективной длиной 0,46 м. Промежуток между диполем и линзой (0,7 м) служит для размещения элементов коррекции (мультипольных корректоров) и диагностики (электростатических пикап-электродов) [7.2].

В длинных прямолинейных промежутках, согласованных с поворотными арками, размещены ВЧ станции и т.н. «включённые» устройства (нестандартное оборудование), такие, как система электронного охлаждения, элементы системы стохастического охлаждения, системы утилизации и сброса пучка и другие. В районе области взаимодействия пучков производится их сведение в вертикальной плоскости и финальная фокусировка в точке встречи. Так как набег бета-тронных фаз практически фиксированы для арок, то вариация бета-тронных частот всего кольца производится квадрупольными корректорами в прямолинейных промежутках.

Основные параметры кольца Коллайдера приведены в Таблице 7.1.1, где рассчитанные среднеквадратические значения эмиттансов, импульсного разброса для указанных параметров средней светимости и средних значений времени роста ВПР даны в зависимости от энергии пучка. На Рис. 7.1.1 показана схема одного из колец с размещением оборудования, соответствующего ионной моде работы Коллайдера. Пучки в обоих кольцах Коллайдера, вращающиеся в противоположные стороны, должны «видеть» одну и ту же фокусирующую структуру для обеспечения равных бета-тронных частот ($Q_{x,1} = Q_{x,2}$, $Q_{y,1} = Q_{y,2}$). Таким образом, двухпертурные квадрупольные линзы в арках и прямолинейных секциях имеют противоположное включение для верхнего и нижнего колец, но триплеты квадрупольных линз финального фокуса включены антисимметрично относительно точки встречи. Соответствующие амплитудные и дисперсионные функции в кольце изображены на Рис. 7.1.2.

Таблица 7.1.1. Основные параметры кольца Коллайдера

Периметр кольца, м	503,04		
Количество пучков	22		
Ср. кв. длина пучка, м	0,6		
β -функция в точке встречи, м	0,35		
Бетатронные частоты, Q_x/Q_y	9,44/9,44		
Хроматичности, Q'_x/Q'_y	-33/-28		
Акцептанс кольца, π мм·мрад	40		
Импульсный акцептанс, $\Delta p/p$	$\pm 0,010$		
Фактор критической энергии, γ_{tr}	7,088		
Энергия ионов $^{197}\text{Au}^{79+}$, ГэВ/н	1,0	3,0	4,5
Количество ионов в пучке	$2,0 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^9$
Ср. кв. импульсный разброс, $\Delta p/p$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Ср. кв. эмиттанс, π мм·мрад	1,1/0,95	1,1/0,85	1,1/0,75
Светимость, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{25}$	$1,0 \cdot 10^{27}$	$1,0 \cdot 10^{27}$
Время роста ВПР, с	160	460	1800

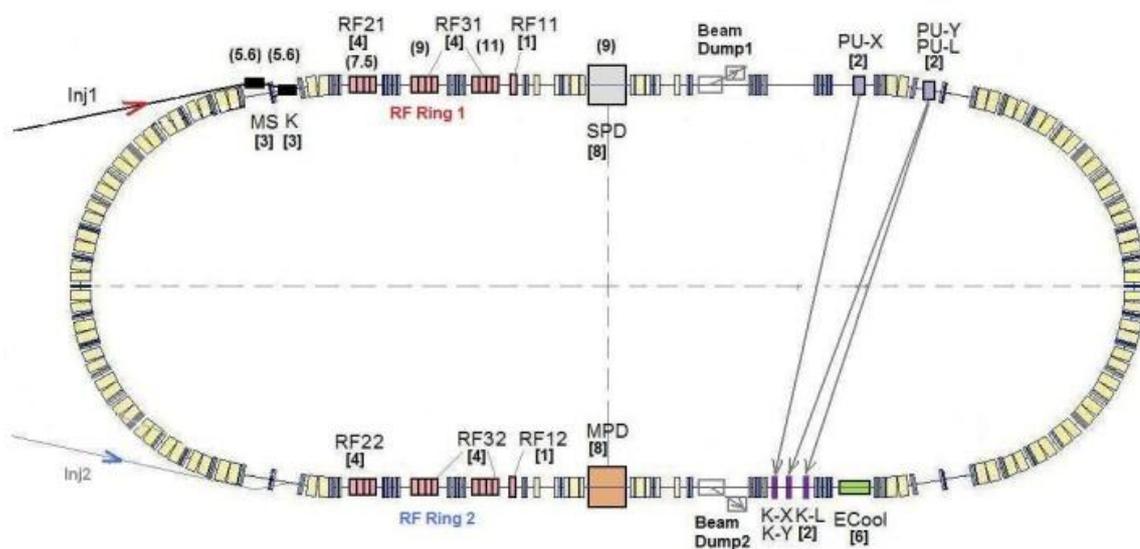


Рис. 7.1.1. Схема Коллайдера и компоновка оборудования в кольце: RF — станции ускоряющего ВЧ напряжения, Beam Dump — системы сброса пучка, PU — пикап-электроды, K — корректоры системы стохастического охлаждения, ECool — система электронного охлаждения, MPD, SPD — детекторы

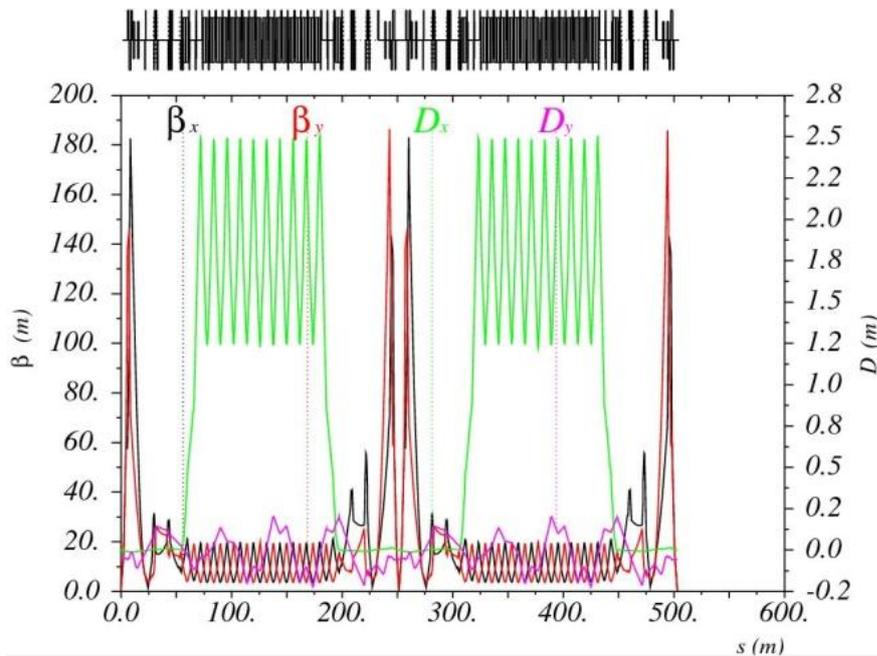


Рис. 7.1.2. Амплитудные функции Твисса $\beta_{x,y}$, дисперсионные функции $D_{x,y}$ Коллайдерного кольца для частот бетатронных колебаний $Q_{x,y} = 9.44/9.44$ и $\Delta p/p = 0.0$

7.1.3 Системы коррекции магнитного поля Коллайдера

Для обеспечения устойчивой циркуляции пучка в структуре Коллайдера должны быть предусмотрены системы коррекции магнитного поля. Рассматривается следующий необходимый набор цепей корректирующих элементов (Таблица 7.1.2): коррекция искажений замкнутой орбиты, коррекция линейного сдвига бетатронных частот, коррекция связи поперечных бетатронных колебаний, компенсация вертикальной дисперсии, коррекция хроматизма бетатронных частот, коррекция зависимости бетатронных частот от амплитуды бетатронных колебаний. Корректирующий элемент длиной 0,3 м содержит до 4-х слоёв сверхпроводящих обмоток «косинусного» типа и по технологии изготовления аналогичен применяемому в Нуклотроне. В Коллайдере мультипольные корректоры располагаются в арках — в промежутке диполь-квадруполь, в длинном прямолинейном промежутке — в модулях, содержащих триплеты квадрупольных линз.

7.1.3.1 Дипольная коррекция искажений замкнутой орбиты

Параметры системы коррекции замкнутой орбиты (з.о.) определялись путём численного статистического эксперимента. Вычисляется замкнутая орбита Коллайдера при случайном наборе основных источников её искажения со следующими среднеквадратическими значениями: для дипольных магнитов относительный разброс полей $\sigma_{\Delta B/B} = 5 \cdot 10^{-4}$, продольное смещение $\sigma_{\Delta s} = 0,5$ мм, поперечное смещение $\sigma_{\Delta y} = 0,5$ мм, поворот относительно продольной оси $\sigma_{\Delta \varphi} = 0,5$ мрад; поперечные смещения квадрупольных линз $\sigma_{\Delta x/\Delta y} = 0,1$ мм. Определяются

максимальные возможные искажения для $N=100$ рассчитанных орбит. К каждой орбите применяется алгоритм коррекции (MICADO [7.4]) при дополнительных условиях ограничения на значения остаточной скорректированной орбиты ($\sigma_{x/y} = 0,1$ мм), максимальное количество используемых корректоров ($n_{corr} = 30 \div 50$), максимальный угол коррекции ($\theta_{corr} \approx 0,01 \theta_{dip}$). На Рис. 7.1.3 приведены максимальные искажения орбиты до и после коррекции и соответствующие максимальные силы дипольных корректоров. В результате определено, что для $n_{corr} \approx 40$ равномерно распределённых в кольце корректоров с силой $\theta_{corr} < 0,5$ мрад, искажения орбиты, соответствующие технически реализуемым допускам на поля дипольных магнитов и юстировку магнитных элементов, могут быть скорректированы до значения $\sigma_{x/y} = 0.1$ мм при «качестве коррекции» (отношение размаха орбиты до и после коррекции) около 30.

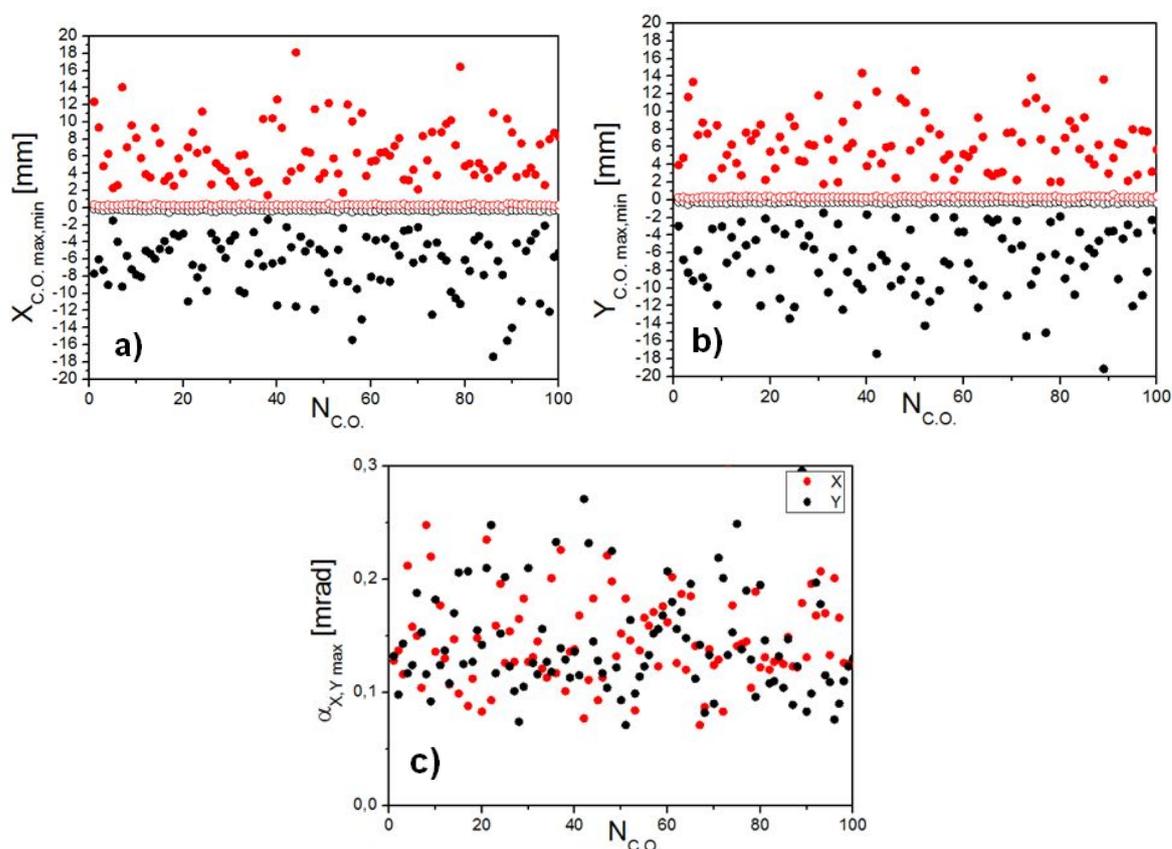


Рис. 7.1.3. Максимальные искажения горизонтальной (a) и вертикальной (b) з.о. до и после коррекции и максимальная сила корректора з.о. (c) в зависимости от номера орбиты

7.1.3.2 Квадрупольная коррекция бетатронных частот

Система питания колец Коллайдера использует один ток питания структурных квадрупольных линз до максимального тока $I_{max} \approx 11$ кА. Оптическая структура поворотных арок является «фиксированной» с точки зрения постоянного набега бетатронной фазы на одну ячейку периодичности ($\mu_{x,y} = 90^\circ$), а также из-за необходимости подавлять горизонтальную дисперсию на краях арок (D_x -dispersion suppressor). Изменение бетатронных частот, выполнение условий

согласования и обеспечение параметров пучка в точках встречи производятся в длинных прямолинейных промежутках посредством корректирующих квадруполь (trim-quadrupoles), которые имеют независимые низко-токовые источники питания ($I_{trim} \approx \pm 1$ кА). Два длинных прямолинейных промежутка (по обе стороны от точки встречи) настраиваются независимым образом, учитывая анти-симметричную относительно точки встречи схему подключения квадруполь финального фокуса. На Рис. 7.1.4 на диаграмме бетатронных частот показаны рабочие точки Коллайдера, а также сетка бетатронных резонансов до 7-ого порядка. Первая область ($Q_{x,y} \approx 9.44$) позволяет эффективно осуществлять стохастическое охлаждение пучка. Если стохастическое охлаждение не может быть применено во всем энергетическом диапазоне Коллайдера, а только в интервале $3 \div 4.5$ ГэВ/н, то во второй области ($Q_{x,y} \approx 9.10$) используется электронное охлаждение до 3 ГэВ/н, а, возможно, и выше. Таким образом, система коррекции обеспечит перестройку бетатронных частот в пределах $9.10 \div 9.48$.

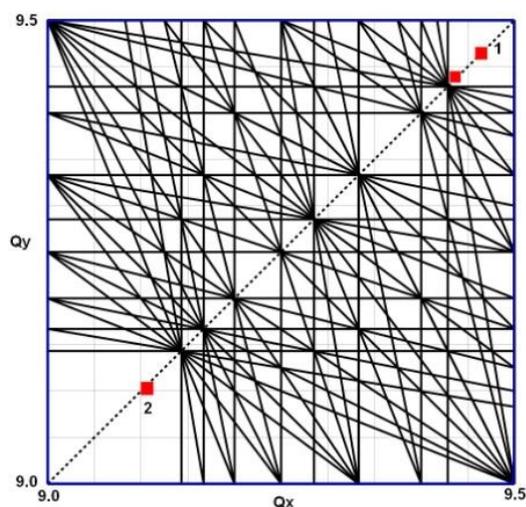


Рис. 7.1.4. Область бетатронных частот Коллайдера. Показаны резонансы бетатронных колебаний до 7-ого порядка. Отмечены возможные рабочие точки кольца 1 и 2

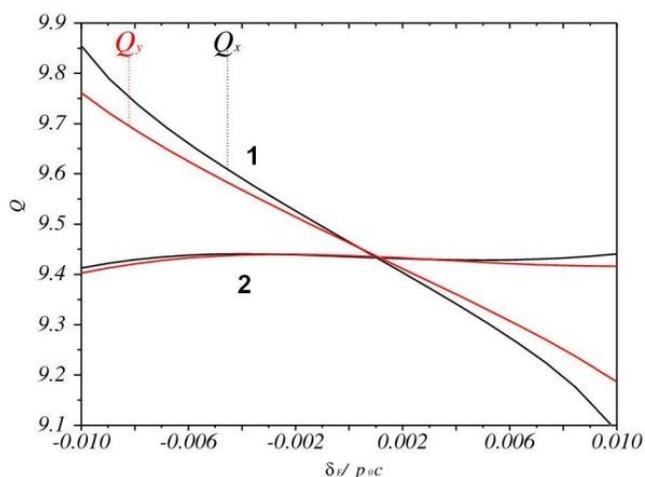


Рис. 7.1.5. Зависимость бетатронных частот от импульсного разброса до (1) и после (2) коррекции хроматичности

«Косые» квадрупольные корректоры (skew quadrupoles) используются в оптике Коллайдера для 2-х целей: коррекция связи горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний; коррекция вертикальной дисперсии и случайных поворотов структурных квадрупольных линз. Первая задача предполагает до четырёх семейств корректоров (независимых источников питания), расположенных в прямолинейных промежутках без дисперсии. Основные источники связи в кольце: соленоид детектора MPD длиной 5,8 м с полем до 0,66 Тл, соленоид системы электронного охлаждения длиной 6 м и полем до 0,2 Тл, случайный поворот квадрупольных линз относительно продольной оси (ожидаемая величина до 0,1 мрад). Коррекция основана на независимой компенсации гармоник двух ближайших к рабочей точке резонансов связи. Например, для точки 1 это резонансы $Q_x - Q_y = 0$ и $Q_x + Q_y = 19$. При встречном включении соленоидов максимальный сдвиг частоты равен 0,01 и связь поперечных колебаний (для неравных поперечных эмиттансов) потребует максимальной силы корректора до 1 Тл/м. Коррекция вертикальной дисперсии потребует, как минимум, двух дополнительных семейств, расположенных в арках вблизи максимумов D_x . Минимальный набор из четырёх корректоров в каждой арке обеспечивает коррекцию D_y и D'_y по кольцу и их компенсацию в точках встречи при максимальном необходимом градиенте 1 Тл/м.

7.1.3.3 Коррекция хроматичности частот бетатронных колебаний

Коррекция хроматичности частот бетатронных колебаний [7.2] одна из самых принципиальных систем коррекций Коллайдера. Большая естественная хроматичность кольца ($Q'_{x,y} \approx -30$), вызванная значительной модуляцией β -функции, особенно в области сведения и взаимодействия пучков, приводит к частотному разбросу $\Delta Q_{x,y} \approx 0.7$ в диапазоне импульсного акцептанса $\Delta p/p = \pm 0.01$ (Рис. 7.1.5), и, как следствие, пересечению резонансов. Секступольные корректоры хроматичности располагаются в дисперсионных арках и разделены на четыре семейства. Набег бетатронной фазы между корректорами одного семейства $\mu_{x,y} = 180^\circ$ позволяет компенсировать во втором порядке влияние секступольной нелинейности на динамическую апертуру. Дополнительные независимые семейства (токи питания) корректоров предполагают возможность коррекции хроматичности второго порядка: $\Delta Q_{x,y} = Q'_{x,y}(\Delta p/p) + Q''_{x,y}(\Delta p/p)^2$. На Рис. 5 показана хроматичность кольца до и после коррекции при условии $Q'_{x,y}(\Delta p/p = 0) = -1,5$. Максимальные градиенты секступольных корректоров достигают 150 Тл/м², что предполагает использование явно-полюсных магнитных элементов.

7.1.3.4 Система октупольных корректоров

Из-за наличия в кольцах Коллайдера сильной вариации амплитудной β -функции (от максимального значения порядка 200 м до минимального значения в точках встречи 0,35 м) система коррекции хроматичности требует значительных нелинейных сил секступольных корректоров. Хотя система

коррекции хроматичности организована достаточно оптимальным образом с точки зрения компенсации эффектов второго порядка от секступольных линз, в оптической структуре Коллайдера предполагается разместить два семейства октупольных корректоров для компенсации разброса бетатронных частот в зависимости от амплитуды бетатронных колебаний частицы: $\Delta Q_x = a_{xx}J_x + a_{xy}J_y$, $\Delta Q_y = a_{xy}J_x + a_{yy}J_y$. По крайней мере 10 корректирующих октупольных обмоток каждого семейства расположены в поворотных арках около максимумов β_x , β_y вблизи квадрупольных линз. Мультипольная обмотка создаёт максимальный градиент 400 Тл/м³.

С другой стороны, эта же система октупольных корректоров может вводить контролируемый разброс бетатронных частот для компенсации т.н. нестабильности типа «голова-хвост» (head-tail instability) посредством механизма, называемого затуханием Ландау (Landau-damping): $\Delta Q_{x,y} = \Delta Q_{x,y,coh} - \Delta Q_{x,y,SC} - \Delta Q_S$, где $\Delta Q_{x,y,coh}$ — когерентный разброс частот, $\Delta Q_{x,y,SC}$ и ΔQ_S — поперечный и продольный разбросы из-за пространственного заряда. Затухание осуществляется при условии малой и отрицательной хроматичности первого порядка.

7.1.4 Расчёт динамической апертуры кольца

Исследование динамики частиц в Коллайдере тесно связано с принципиальным вопросом о значении динамической апертуры (ДА), то есть области стабильного и долговременного движения частиц в нелинейных полях магнитных элементов и под воздействием сил пространственного заряда. Для оценки ДА было использовано два метода, реализованных в программе MAD-X [7.4]: первый, метод тонких линз; второй — РТС (Polymorphic Tracking Code). Оба метода предполагают симплектическое интегрирование движения заряженных частиц, однако, метод тонких линз, в отличие от РТС, позволяет учесть силы пространственного заряда. При расчёте обоими методами учитывались следующие факторы: включение ВЧ ускоряющего поля, включение системы компенсации хроматичности, нелинейности дипольных магнитов. Динамика пучка проверялась для $N_{part} = 10^3$ — количества частиц и $N_{turn} = 10^5$ — количества оборотов. Величины ДА, полученный из численных экспериментов, аппроксимировались формулой Giovannozzi, которая делает попытку найти значение ДА на «бесконечности», когда численное моделирование невозможно: $\sqrt{D(N)} = \sqrt{D_\infty} (1 + b/[\log(N)]^k)$, где D_∞ — асимптотическая ДА, b и k параметры, определяемы из зависимости ДА от количества оборотов частицы в кольце $D(N)$. Соответствующие аппроксимации для РТС и метода тонких линз приведены на Рис. 6. В обоих случаях асимптотическая ДА для выбранной рабочей точки $Q_{x,y} = 9,44/9,44$ больше аксептанса кольца $A_{x,y} = 40 \pi$ мм·мрад: $D_\infty \approx 100 \pi$ мм·мрад (РТС), 60π мм·мрад (тонкие линзы).

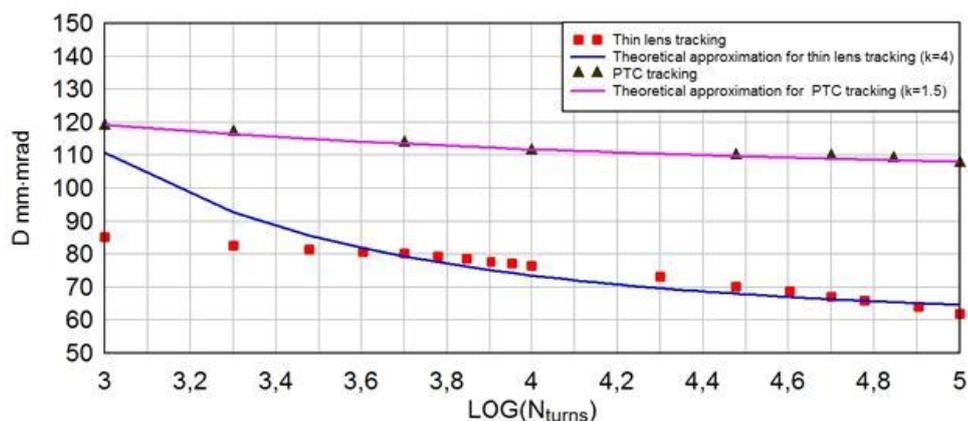


Рис. 7.1.6. Динамическая апертура (методы РТС и тонких линз) в зависимости от количества оборотов N_{turn}

Таблица 7.1.2. Характеристики мультипольного корректора. ($L = 0,3$ м, $R_{pole} = 66$ мм). Состав корректирующих элементов в кольце Коллайдера

Мультипольная компонента	Функция	Макс. параметр магнитного поля	Макс. параметр источника питания, кА витков	Количество корректоров
Диполь	Управление и коррекция з.о.	0,15 Тл	8,0	40
Квадруполь	Коррекция частоты	2,2 Тл/м	3,8	12
«Косой» квадруполь	Компенсация связи; D_y — коррекция	1,0 Тл/м	1,7	4; 8
Секступоль	Контроль хроматичности	150 Тл/м ²	5,7	48
Октуполь	Коррекции 2-ого порядка	400 Тл/м ³	3,8	20

7.2 МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система Коллайдера NICA строится по аналогии с магнитной системой действующего сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон [7.5]. Технология изготовления магнитов Нуклотрона была предложена и развита в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Она отличается высокой эффективностью и надёжностью при относительной простоте и низких затратах. Наличие в Лаборатории технологических участков для производства и испытания магнитов, а также обученного персонала делает ещё более обоснованным выбор для Коллайдера NICA магнитов типа «оконная рама» с обмоткой из трубчатого сверхпроводника. Периметр Коллайдера с максимальной жёсткостью 45 Тл·м составит около 503 м. Два накопительных кольца Коллайдера располагаются одно над другим, имеют форму «стадиона» и размещаются во вновь сооружаемом помещении. Основные параметры двух апертурных структурных магнитов Коллайдера NICA приведены в Таблице 7.2.1 и Таблице 7.2.2.

Таблица 7.2.1. Основные характеристики дипольного магнита Коллайдера NICA

Количество магнитов в кольце		80 + 1 измерительный магнит
Конструкция		Двух апертурный магнит типа «оконная рама» со сверхпроводящей обмоткой и «холодным» ярмом
Магнитная жёсткость, $B\rho$	Тл·м	45
Максимальная индукция магнитного поля в апертуре, B_{\max}	Тл	1,8
Минимальная индукция магнитного поля в апертуре, B_{\min}	Тл	0,57
Эффективная длина магнита, L	м	1,94
Скорость изменения магнитного поля, dB/dt	Тл/с	$\leq 0,1$
Неоднородность магнитного поля, $\Delta B/B$ на радиусе 30 мм		$\leq 2 \cdot 10^{-4}$
Апертура пучковой камеры (гориз./верт.)	мм/мм	120/70
Расстояние между пучками	мм	320
Угол поворота	град	4,5
Ширина ярма	м	0,302
Высота ярма	м	0,548
Масса магнита	кг	1670
Ток при максимальном магнитном поле	кА	10,4
Число витков в каждой обмотке (на полюс)		10(5)
Индуктивность каждой обмотки	мкГн	450
Динамические тепловыделения	Вт	8,4
Статический теплоприток (без тока)	Вт	4,4
Общие тепловыделения	Вт	12,8
Диаметр охлаждающего канала кабеля	мм	3,0
Перепад давления между питающим и отводящим гелиевым коллектором	кПа	≤ 27
Максимальная температура гелия в обмотке	К	4,65

Магнитная система Коллайдера состоит из двух арок, каждая из которых включает 12 FODO регулярных периодов магнитной системы, и двух длинных прямолинейных промежутков. Полный регулярный период включает в себя четыре дипольных и два квадрупольных магнита, два мультипольных корректирующих магнита и датчик положения пучка. Длинные прямолинейные промежутки кроме регулярных квадрупольных магнитов содержат 12 квадрупольных магнитов финального фокуса и вертикально разводящие магниты.

Таблица 7.2.2. Основные характеристики квадрупольного магнита Коллайдера NICA

Количество магнитов в кольце		86 + 2 измерительных магнита
Конструкция		Двух апертурный магнит со сверхпроводящей обмоткой и «холодным» ярмом с гиперболическими полюсами
Максимальный градиент магнитного поля, G_{\max}	Тл/м	23,1
Минимальный градиент магнитного поля, G_{\min}	Тл/м	7,3
Эффективная длина магнита, L	м	0,47
Скорость изменения градиента магнитного поля, dG/dt	(Тл/м)/с	$\leq 1,3$

Неоднородность градиента магнитного поля, $\Delta G/G$ на радиусе 30 мм		$\pm 2 \cdot 10^{-4}$
Расстояние от оси до полюса	м	0,0475
Апертура по вакуумной камере (гор/вер)	мм/мм	120/70
Расстояние между пучками	мм	320
Ширина ярма	м	0,300
Высота ярма	м	0,594
Масса магнита	кг	250
Ток при максимальном градиенте поля	кА	10,4
Число витков в обмотке (на полюс)		8(2)
Индуктивность	мкГн	94
Тепловыделения	Вт	5,7
Диаметр охлаждающего канала кабеля	мм	3,0
Перепад давления между питающим и отводящим гелиевым коллектором	кПа	≤ 27
Максимальная температура гелия в обмотке	К	4,65

На Рис. 7.2.1 и Рис. 7.2.2 представлено поперечное сечение дипольного и квадрупольного магнит Коллайдера, соответственно. На Рис. 7.2.3 изображён модуль с дипольным магнитом Коллайдера. Диаметр вакуумного кожуха криостата составляет 812 мм. Между вакуумным кожухом и магнитом расположен тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота. К магниту прикреплены питающий и отводящий гелиевые коллекторы. Однослойная обмотка магнита изготовлена из трубчатого сверхпроводящего кабеля, разработанного в ЛФВЭ ОИЯИ. Внутри кабеля имеется охлаждающий канал для циркуляции потока двухфазного (кипящего) гелия. Обмотка помещена в зазор железного ярма магнита, которое воспринимает действующие на неё пондеромоторные силы. Ярмо изготовлено из листов электротехнической стали толщиной 0,65 мм, скреплённых между собой с помощью сварки к уголкам и пластинам из нержавеющей стали. Ярмо охлаждается потоком гелия после обмотки.

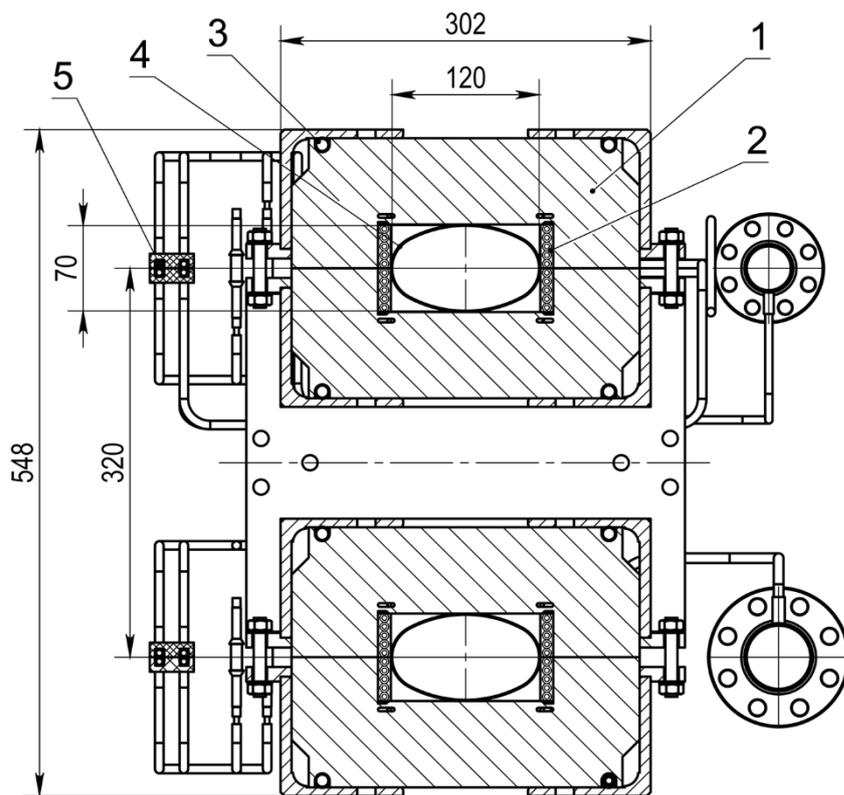


Рис. 7.2.1. Поперечное сечение дипольного магнита Коллайдера NICA

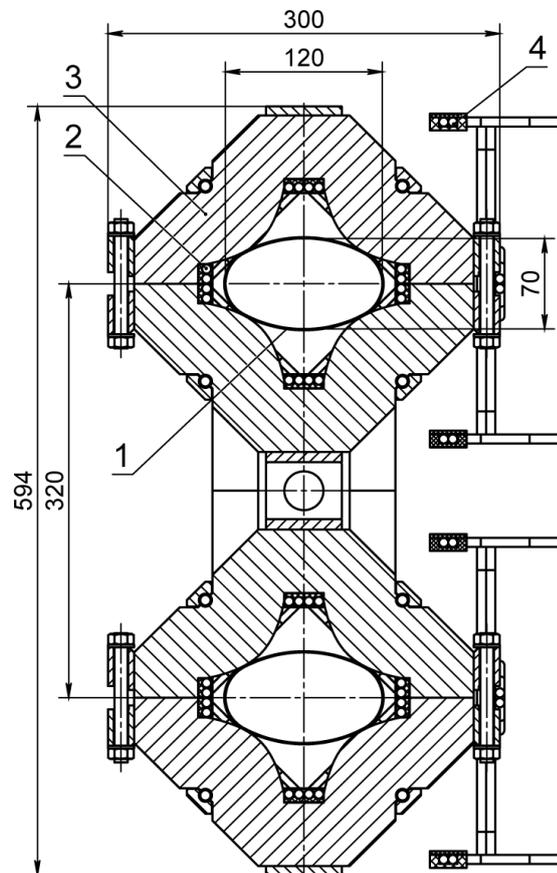


Рис. 7.2.2. Поперечное сечение квадрупольного магнита Коллайдера NICA

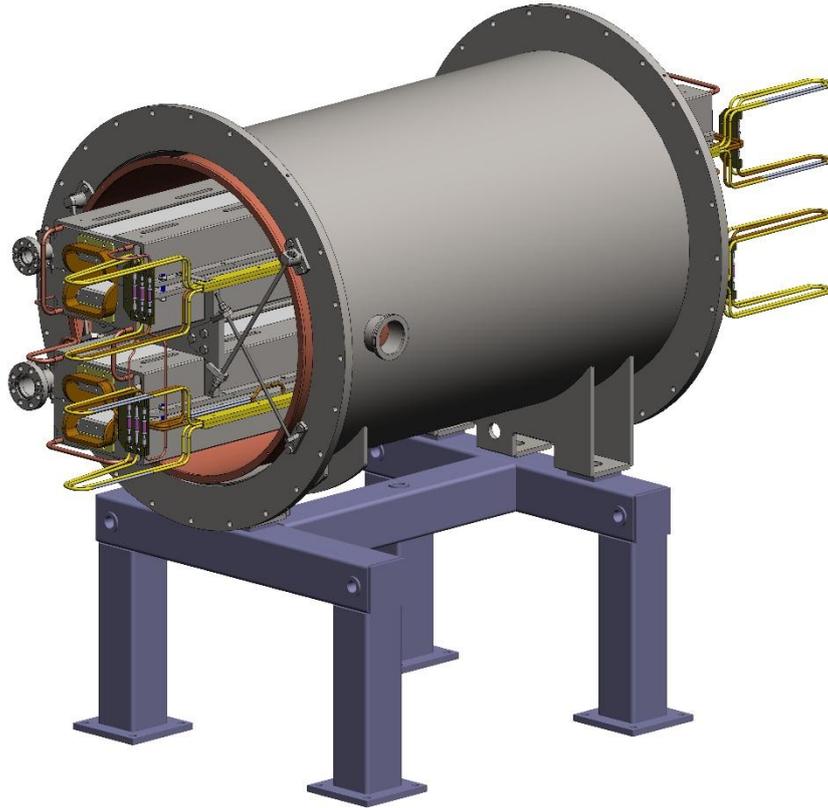


Рис. 7.2.3. Модуль с дипольным магнитом Коллайдера NICA

7.3 СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ, ЗАЩИТЫ И ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ

7.3.1 Подробное описание и аналоги

Система электропитания Коллайдера строится по аналогии с системой питания действующего быстроциклирующего сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон [7.5].

7.3.2 Требования к системе

Основные параметры нагрузки приведены в Таблице 7.3.1. Система питания должна обеспечить:

- формирование магнитных полей в соответствии с требуемым циклом (Рис. 7.3.1),
- заданную точность и диапазон изменения токов в структурных магнитных элементах Коллайдера (по Таблице 7.3.1),
- безаварийную работу сверхпроводящих магнитов в случае появления нормальной зоны.

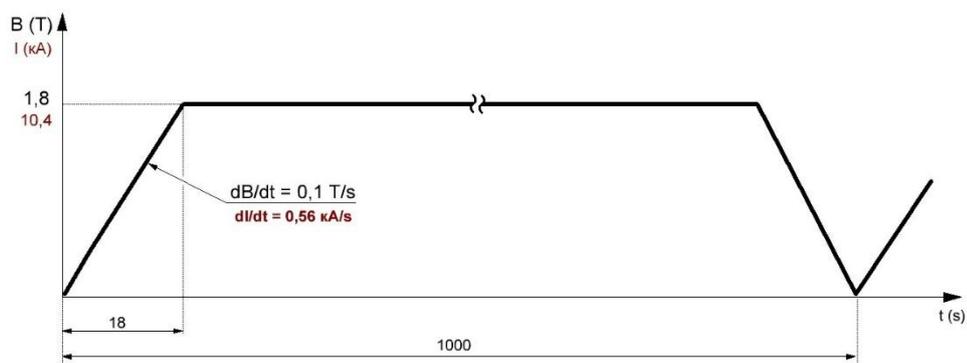


Рис. 7.3.1. Цикл поля (тока) структурных магнитов Коллайдера

Таблица 7.3.1. Параметры структурных магнитов Коллайдера

Суммарная индуктивность дипольных магнитов, L_m	мГн	36
Суммарная индуктивность квадрупольных фокусирующих магнитов, L_F	мГн	4,6
Суммарная индуктивность квадрупольных дефокусирующих магнитов, L_D	мГн	4,6
Ток дипольного магнита при максимальном поле 1,8 Тл, I_m	кА	10,4
Стабильность тока, $\Delta I_m/I_m$		$2 \cdot 10^{-4}$
Ток квадрупольного фокусирующего магнита при максимальном градиенте поля, I_F	кА	10,4
Диапазон увеличения тока квадрупольного фокусирующего магнита, % от I_F	%	10
Стабильность тока, $\Delta I_F/I_F$		$2 \cdot 10^{-4}$
Ток квадрупольного дефокусирующего магнита при максимальном градиенте поля, I_D	кА	10,4
Диапазон увеличения тока квадрупольного дефокусирующего магнита, % от I_D	%	8
Стабильность тока, $\Delta I_D/I_D$		$2 \cdot 10^{-4}$
Максимальное напряжение прикладываемое к цепи последовательно включённых всех структурных магнитов при скорости изменения магнитного поля 0,1 Тл/с, U_n	В	55

7.3.3 Краткое описание системы

Коллайдер состоит из 2-х независимых колец. Питание каждого из 2-х колец осуществляется от своих источников ИП1, ИП2 и ИП3.

На Рис. 7.3.2 представлена схема питания одного из 2-х колец. Для каждого из элементов системы питания индекс в начале наименования обозначает принадлежность к 1-му или 2-му кольцу.

При построении системы принято за основу последовательное соединение структурных дипольных магнитов, квадрупольных фокусирующих и дефокусирующих линз Коллайдера (Рис. 7.3.2). Основной мощный источник ИП1 системы питания формирует требуемый ток с заданной скоростью роста поля в общей цепи. Для гибкой регулировки рабочей точки ускорителя предназначены два дополнительных источника питания ИП2 и ИП3 существенно меньшей мощности. ИП2 позволяет одновременно изменять градиент поля в фокусирующих и дефокусирующих линзах, ИП3 — только в дефокусирующих.

Для эвакуации энергии (ЭЭ) запасённой в сверхпроводящих элементах в случае срыва сверхпроводимости применены ключи, соединённые последовательно с цепью магнитов и линз.

Они управляются сигналом внешней системы детектирования появления нормальной фазы в сверхпроводнике. При возникновении сигнала ключ размыкается, и энергия, накопленная в магните, рассеивается в резисторах гашения поля, включённых параллельно ключам. Последовательно соединённые дипольные магниты (2 цепи $1/2 L_m$) и квадрупольные линзы (по 2 цепи $1/2 L_f$ и $1/2 L_d$) через ключи ЭЭ (1К1...1К6) подключены к источнику по симметричной схеме относительно питающего напряжения. Тиристорный ключ ТКН шунтирует источник питания при ЭЭ.

Дополнительный источник ИП2 токодобавки в фокусирующие и дефокусирующие линзы через ключи эвакуации энергии К21 и К22 подключён к цепи последовательно соединённых линз. Эти ключи размыкаются при срыве сверхпроводимости детектируемого внешней системой появления нормальной фазы в сверхпроводнике и вводят в цепь резисторы гашения поля. Ключ К23 при этом замыкается и отсекает ИП2 от магнитов. Аналогично подключается источник ИП3 токодобавки в дефокусирующие линзы через ключи К31, К32 и К33 к цепи дефокусирующих линз.

В измерительных магнитах МИ1, линзах ФИ1, и ДИ1, (Рис. 7.3.2) установлены индукционные датчики магнитного поля, сигнал с которых поступает в устройства диагностики и управления.

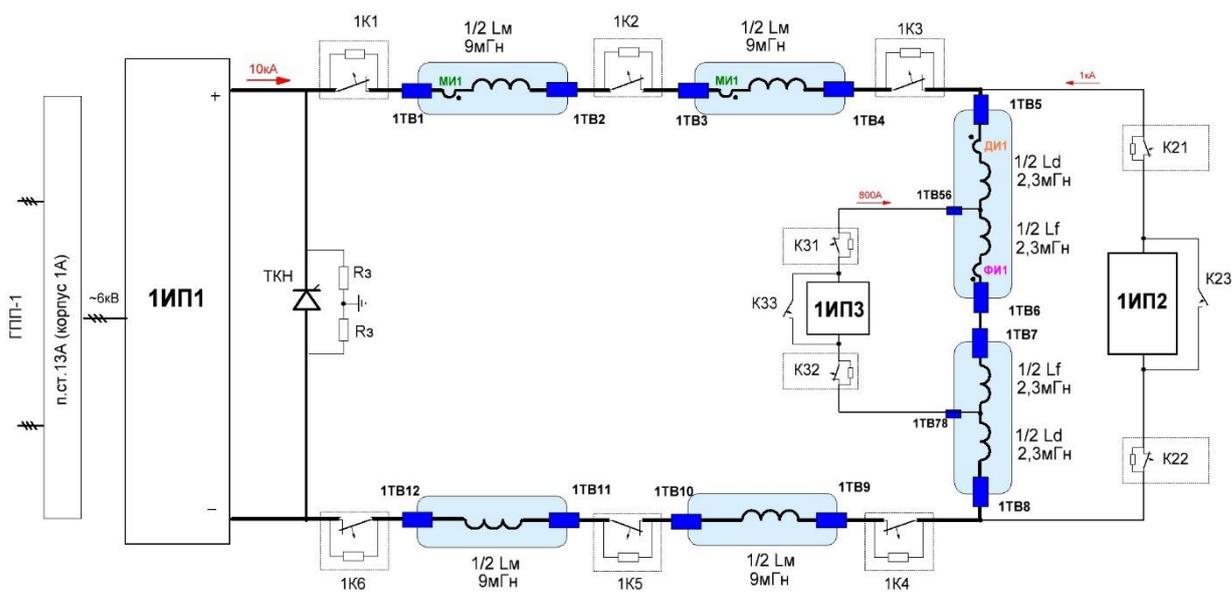


Рис. 7.3.2. Принципиальная схема питания структурных магнитов Коллайдера 1-го кольца Коллайдера

Основные требования к ЭЭ:

- вывод энергии из СП магнитов постоянной времени 160 мс,
- при ЭЭ максимальное напряжение на тоководах относительно потенциала «земли» не должно быть более 500 В,

- соединение цепи структурных линз без ключей ЭЭ для обеспечения прецизионного формирования рабочей точки Коллайдера источниками ИП2 и ИП3.

Сопротивление гашения поля определяется отношением индуктивности элементов к постоянной времени процесса ЭЭ. При заданных параметрах суммарное сопротивление равно 0,29 Ом.

Потенциальная диаграмма с распределением потенциала относительно «земли» на структурных магнитных элементах при эвакуации максимального тока 10,4 кА приведена на Рис. 7.3.3.

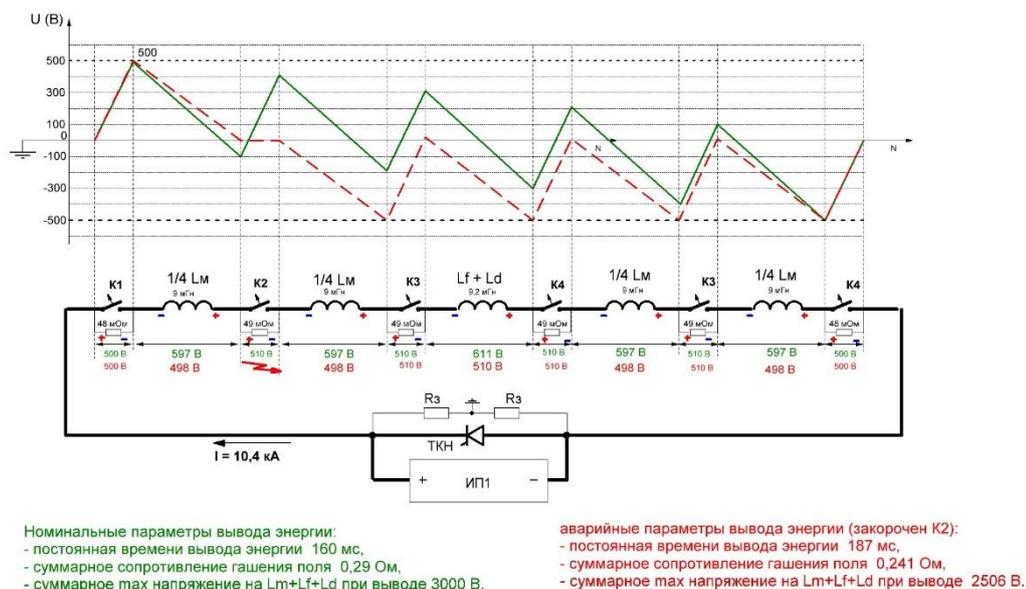


Рис. 7.3.3. Распределение потенциала относительно «земли» структурных магнитных элементах при эвакуации максимального тока 10,4 кА в штатном режиме — зелёная сплошная линия и при выходе из строя 1-го ключа (K2) — красная пунктирная линия.

7.3.4 Размещение оборудования

Все элементы системы питания размещаются в здании Коллайдера. Измерительный период является единым для 2-х колец. На Рис. 7.3.4 показана часть коммутации измерительных магнитов полупериода, относящаяся к 1-му кольцу.

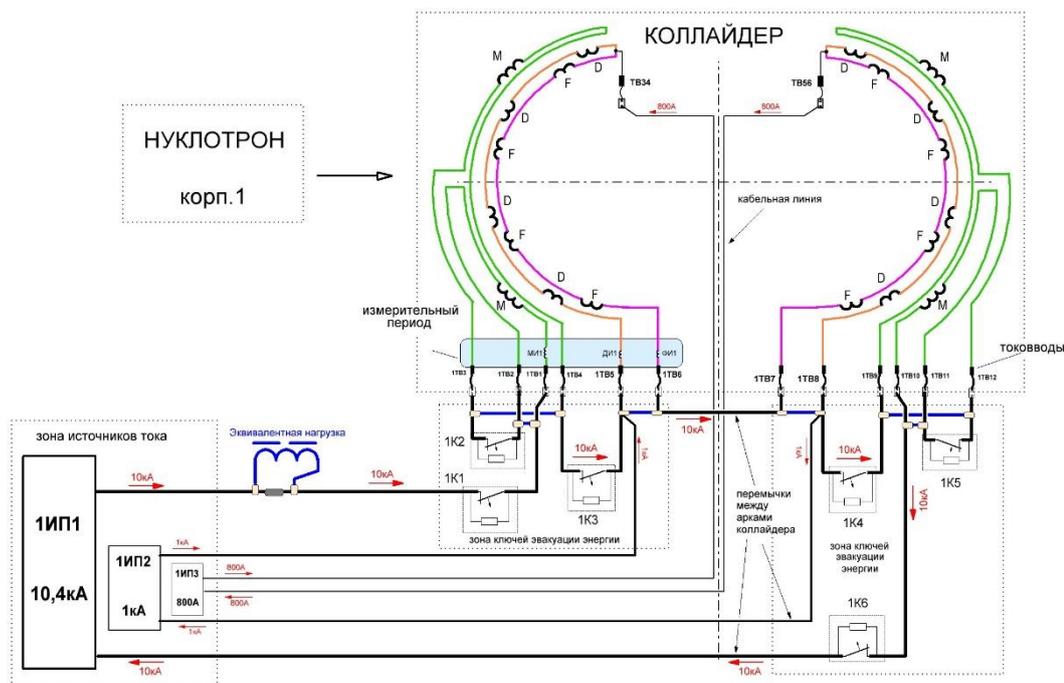
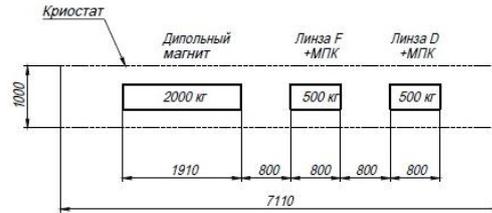


Рис. 7.3.4. Принципиально-монтажная схема питания одного кольца Коллайдера.

Ключи эвакуации энергии (КЭЭ) 1К1...1К6 располагаются в зоне токовводов рядом с измерительным периодом. Между арками Коллайдера прокладываются кабельные трассы системы питания. Эквивалентная нагрузка (дрессели) для проверки источников питания и КЭЭ размещается вблизи от силовой трассы ИП1. Для включения эквивалентной нагрузки силовая схема снабжается сильноточными коммутаторами и силовыми трассами (на Рис. 7.3.4 выделены синим цветом). Эквивалентная нагрузка является единой для обеих систем питания. Одновременно настраивать на эквивалент можно только одну систему питания.

На Рис. 7.3.5 представлены 2 варианта компоновки измерительного периода Коллайдера.

Вариант 1.



Вариант 2.



Рис. 7.3.5. Схема компоновки измерительного периода Коллайдера

План размещения устройств системы питания в помещениях 105, 106 и 114 здания Коллайдера представлен на Рис. 7.3.6.

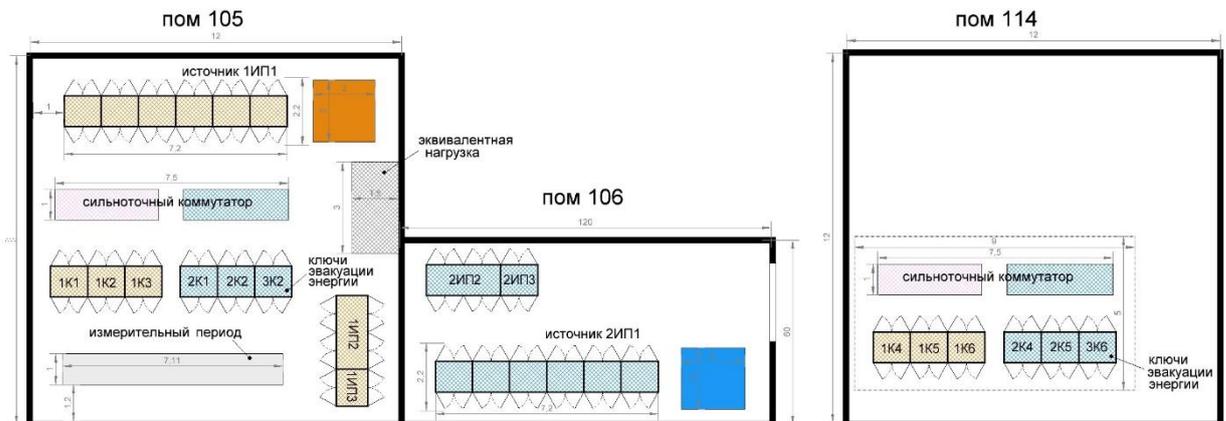


Рис. 7.3.6. Размещение оборудования измерительного периода и системы питания в помещениях 105, 106 и 114 здания Коллайдера (размеры указаны в метрах)

КЭЭ конструктивно выполнен в виде шкафа двустороннего обслуживания с размерами 1200 × 1000 × 2200 мм, двери двухстворчатого шкафа по 600 мм, вес не более 500 кг.

Габариты источника питания ИП1: трансформатор 2000 × 2000 × 2200 мм, вес 2 т, преобразователь — 6 шкафов двустороннего обслуживания с размерами 1200 × 1000 × 2200 мм, двери двухстворчатого шкафа по 600 мм, вес каждого не более 800 кг.

Габариты источника питания ИП2: 2 шкафа двустороннего обслуживания с размерами 1200 × 1000 × 2200 мм, двери двухстворчатого шкафа по 600 мм, вес каждого не более 800 кг.

Габариты источника питания ИПЗ: 1 шкаф двустороннего обслуживания с размерами 1200 × 1000 × 2200 мм, двери двухстворчатого шкафа по 600мм, вес не более 800 кг.

7.4 ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная система пучковой (В — beam) камеры Коллайдера разделяется на два типа: «холодная» (С — cold) при температуре жидкого гелия и «тёплая» (Н — hot) при комнатной температуре (Таблица 7.4.1). Вакуумная система Коллайдера включает две пучковые камеры, которые располагаются друг над другом, поэтому вакуумные посты пучковых камер имеют расположение сверху (Т — top) и снизу (В — bottom) относительно пучковых камер.

Холодная пучковая камера располагается внутри вакуумного изоляционного объёма (С — cryostat), который имеет две ступени получения вакуума: предварительный (Р — prior) и высоковакуумный (Н — high).

Таблица 7.4.1. Параметры вакуумных постов

		Оборудование вакуумного поста	Пример	Кол-во на пост	Мощность, кВт	Вес, кг	Расход воды, м ³ /ч
Изоляционный объем	Предварительная откачка	Насос типа Рутса	Okata500	1	1,5	125	нет
		Пластинчато-роторный насос	DUO125	1	4,0	215	нет
		Вакуумная арматура			1,1	100	нет
		ИТОГО на пост			6,6	440	нет
	Высоковакуумная откачка	Турбомолекулярный насос	HiPace 800	1	0,1	14	0,1
		Спиральный насос	TriScroll	1	1,0	26	нет
		Вакуумная арматура			0,2	60	0,02
		ИТОГО на пост			2,2	100	0,12
Пучковая камера	Холодная камера	Турбомолекулярный насос	HiPace 300	2	0,1	7	0,05
		Спиральный насос	TriScroll	1	1,0	26	нет
		Сорбционный насос		1	2,1	86	0,18
		Вакуумная арматура			0,2	70	0,02
		ИТОГО на пост			3,2	110	0,12
	Тёплая камера	Турбомолекулярный насос	HiPace 300	2	0,1	7	0,05
		Спиральный насос	TriScroll	1	1,0	26	нет
		Магниторазрядный насос	Vaclon Plus 75	1	0,4	19	нет
		Вакуумная арматура			0,2	70	0,02
		ИТОГО на пост			3,2	110	0,12

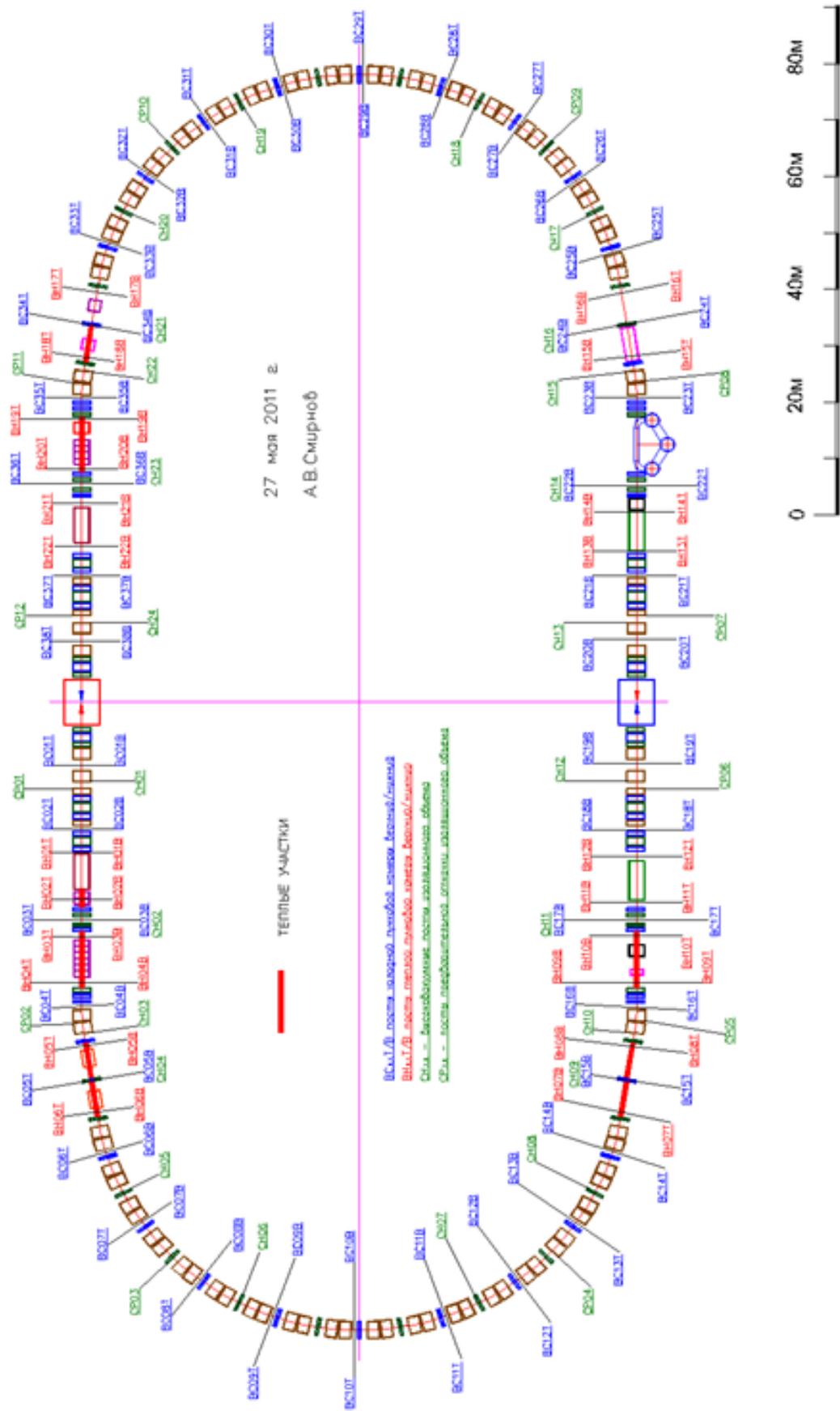


Рис. 7.4.1. Схема расположения вакуумных постов Коллайдера

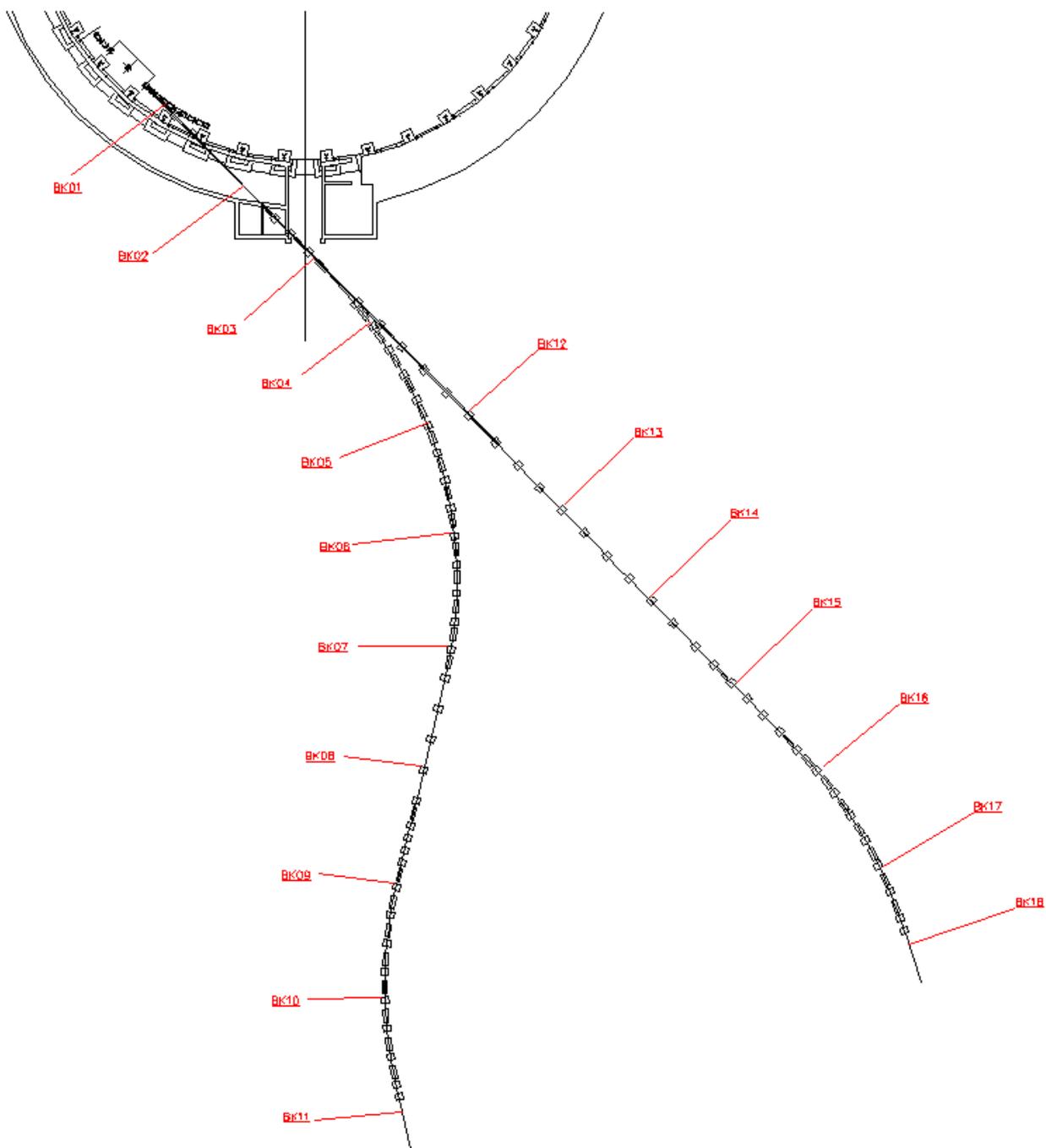


Рис. 7.4.2. Схема расположения вакуумных постов каналов инжекции из Нуклотрона в Коллайдер

Количество вакуумных постов Коллайдера (Таблица 7.4.2) определяется величиной предельного вакуума в Коллайдере порядка 10^{-11} Торр и диаметром вакуумной камеры 8 см. Вакуумные посты для откачки пучковой камеры располагаются в промежутках между магнитными элементами по возможности равномерно по всему периметру кольца в зависимости от типа участка: «холодный» или «тёплый» (Рис. 7.4.1).

Вакуумные посты высоковакуумной откачки изоляционного объёма располагаются только в тех местах, где имеется "холодная" вакуумная камера. Посты предварительной откачки изоляционного

объёма могут быть выполнены в виде передвижных вакуумных постов. Необходимый предельный вакуум изоляционного объёма составляет 10^{-7} Торр.

Откачка каналов инжекции (ВК) из Нуклотрона в Коллайдер осуществляется такими же вакуумными постами (Рис. 7.4.2), которые используются для откачки «тёплой» пучковой камеры Коллайдера (Таблица 7.4.2). Предельный вакуум в каналах инжекции составляет порядка 10^{-10} Торр. Вакуумные посты располагаются по возможности равномерно вдоль каналов между магнитными элементами.

Таблица 7.4.2. Общее количество вакуумных постов Коллайдера и каналов инжекции

Вакуумный пост	Обозначение	Кол-во постов	Мощность, кВт	Вес, кг	Расход воды, м ³ /ч
Предварительной откачки изоляционного объёма	СР	12	79,2	5280	–
Высоковакуумной откачки изоляционного объёма	СН	24	52.8	2400	2.88
«Холодной» пучковой камеры	ВС	76	243.2	8360	9.12
«Тёплой» пучковой камеры	ВН	52	166.4	5720	6.24
Каналов инжекции («тёплая» пучковая камера)	ВК	18	57.6	1980	2.16
ИТОГО		176	600	23 740	20.4

Для всех вакуумных постов необходимо подвести воздух высокого давления 6 атм для обеспечения работы вакуумной арматуры: шиберы, затворы и т.д. Источники питания и блоки управления вакуумными насосами должны находиться снаружи за радиационной защитой. Для соединения с насосами используются специальные кабели, номинальная длина которых составляет $20 \div 30$ м, максимальная длина 50 м. Данное ограничение накладывает требование, что источники питания и блоки управления вакуумных насосов должны располагаться в специальных шкафах управления снаружи радиационной защиты равномерно по кольцу Коллайдера и каналов инжекции. Расстояние между шкафами управления и, соответственно, расстояние между поперечными кабельными каналами в радиационной защите не должно превышать расстояние 50 м. Шкафы управления для вакуумного оборудования должны находиться в условиях, соответствующих стандартным условиям для размещения электронного оборудования: температурный интервал $15 \div 40$ °С, влажность $30 \div 80$ %.

7.5 СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ И СБРОСА ПУЧКА

7.5.1 Система инжекции пучка

Система инжекции пучка в Коллайдер предназначена для однооборотной инжекции ядер тяжелых элементов в кольца Коллайдера с минимальными потерями. В Таблице 7.5.1 приведены основные параметры пучка при инжекции в Коллайдер.

Таблица 7.5.1. Основные параметры пучка при инжекции в Коллайдер

Ионы	Au ⁷⁹⁺
Интенсивность	до 1·10 ⁹
Энергия ионов, ГэВ/н	1 ÷ 4,5
Эффективность инжекции, %	95
Поперечные 95 %-ные эмиттансы, π -мм·мрад	< 14 (гор.)/< 6 (верт.)

7.5.1.1 Структура системы инжекции

Основными элементами системы инжекции пучка являются септумные и ударные магниты, состоящие из модулей двух типов: основных и корректирующих. Септум-магниты служат для ввода пучка в вакуумные камеры колец Коллайдера. Ударные магниты служат для посадки пучка на замкнутую орбиту.

Элементы системы размещаются внутри криостата в прямолинейных промежутках, расположенных в арке Коллайдера (см. Рис. 7.5.1.1).

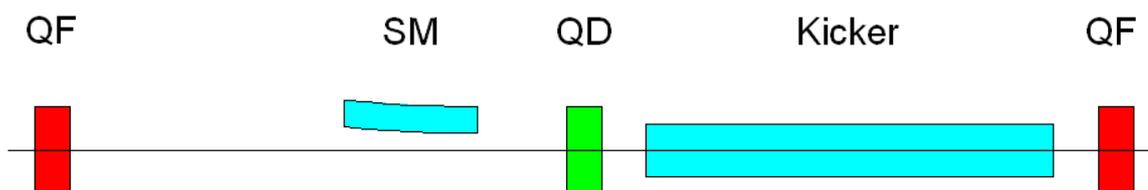


Рис. 7.5.1. Размещение элементов системы инжекции пучка в Коллайдере. Обозначения: QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы Коллайдера, SM — септум-магнит, Kicker — ударный магнит

7.5.1.2 Временные диаграммы работы системы инжекции

Септумные и ударные магниты работают в импульсном режиме. Частота повторения импульсов — 0,125 Гц, что соответствует поочередной инжекции ионов в кольца Коллайдера.

Основные и корректирующие модули ударных магнитов имеют различные формы импульсов токов. Амплитуды и времена начала импульсов выбираются таким образом, что временная диаграмма интеграла магнитного поля, действующего на проходящие ударный магнит ионы, имеет плато с допустимой неоднородностью.

На Рис. 7.5.2 приведён пример временной диаграммы работы модулей ударного магнита.

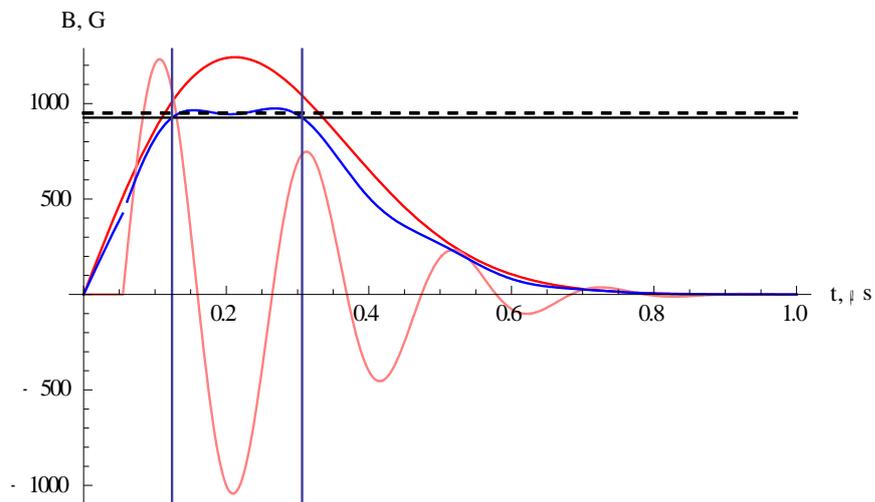


Рис. 7.5.2. Временная диаграмма магнитных полей в модулях ударного магнита. Обозначения: красный — магнитное поле в основном модуле, розовый — магнитное поле в корректирующем модуле, синий — среднее магнитное поле в ударном магните

7.5.2 Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы инжекции было проведено моделирование динамики ионных пучков при вводе в Коллайдер. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD. На Рис. 7.5.3 показана траектория и огибающие инжектируемого пучка.

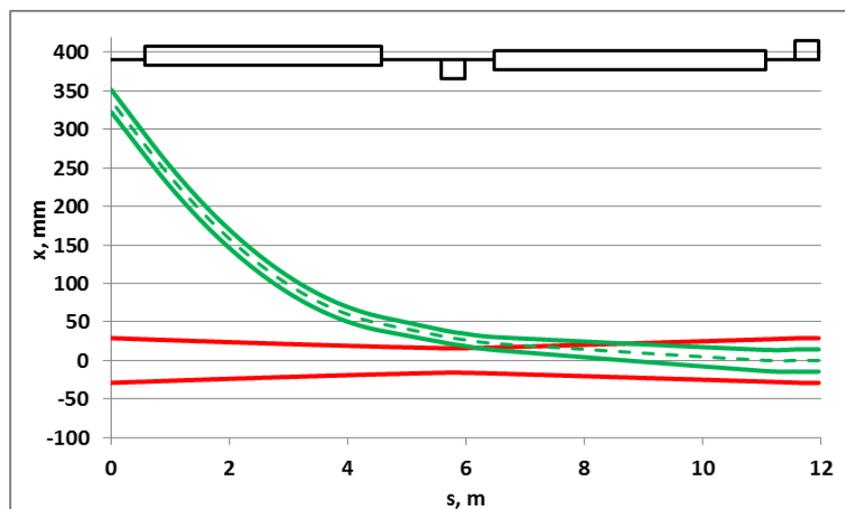


Рис. 7.5.3. Траектория и огибающие пучка, инжектируемого в Коллайдер

7.5.3 Элементы системы инжекции

Септум-магниты системы инжекции аналогичны септум-магниту системы быстрого вывода пучка из Бустера. Септум-магниты имеют длину 1,5 м. Толщина ножа составляет 4 мм. Зазор между пластинами септум-магнитов — 45 мм. Максимальное магнитное поле — 1 Тл, соответствующий ток в пластинах — 100 кА.

Ударные магниты системы инжекции аналогичны ударному магниту системы быстрого вывода пучка из Бустера. Каждый ударный магнит разбит на три криостатных модуля: два основных и один корректирующий. Полная длина ударного магнита — 4,58 м. Максимальное магнитное поле — 0,13 Тл, соответствующий ток в проводниках — 15 кА.

Для питания устройств системы инжекции служат источники питания септум-магнитов и источники питания модулей ударного магнита, размещаемые в здании Коллайдера, в непосредственной близости от участков инжекции.

Источники питания септум-магнитов размещаются в смежных с туннелем Коллайдера помещениях. Источники питания импульсные, частота повторения импульсов — 0,125 Гц. Импульс тока имеет форму, близкую к полусинусоиде, длительность импульса — около 10 мкс. Максимальный ток — 100 кА. Неоднородность тока на вершине импульса в течение вывода пучка не превышает $\pm 2\%$.

Источники питания модулей ударного магнита, установленные на передвижные стойки, размещаются в непосредственной близости от модулей. Источники питания импульсные, частота повторения импульсов — 0,125 Гц. Длительности импульсов тока в основных и корректирующих модулях — менее 900 нс, при этом эффективная длительность плато суммарного импульса всех модулей ударного магнита составляет $150 \div 200$ нс. Максимальный ток — 15 кА.

7.5.4 Система аварийного сброса пучка Коллайдера

Система аварийного сброса пучка Коллайдера (beam-dump) предполагает быстрый вывод всех циркулирующих накопленных пучков каждого из колец в течение одного или нескольких оборотов. Отклонённые частицы направляются за пределы апертуры кольца в ловушку-поглотитель. Система сброса организована в каждом из колец в длинном прямолинейном промежутке, граничащем с областью сведения-разведения пучков. На Рис. 7.5.6 изображена схема сброса пучка в горизонтальной плоскости. На схеме изображены: аксептанс кольца (зелёная кривая), циркулирующий и выведенный пучки (синяя и красная кривые). Также цифрами обозначены элементы кольца: 1 — триплет квадрупольных линз финального фокуса (одно-апертурные линзы), 2 — вертикальные дипольные магниты сведения пучков, 3 — структурные (двух-апертурные) линзы; а также элементы системы сброса: 4 — кикер-магнит (параметры для максимальной энергии вывода $E_K = 4,5$ ГэВ/н: при эффективной длине $L_K = 3,6$ м угол отклонения $\theta_K = 8$ мрад, магнитное поле $B_{K, \max} = 0,1$ Тл), 5 — септум-магнит (эффективная длина $L_{MS} = 2,3$ м, угол отклонения $\theta_{MS, \max} = 100$ мрад, магнитное поле $B_{MS, \max} = 2$ Тл, толщина перегородки до 2 см). Для апертуры кикера $X_a \times Y_a = 5 \times 8$ см, можно оценить энергетические характеристики устройства: ток питания $I = B_K Y_a / \mu_0 = 6,4$ кА, индуктивность $L = \mu_0 L_K X_a / Y_a = 2,8$ мкГн, при длительности фронта $\tau = 50$ нс, $R = L / \tau = 55$ Ом, необходимая амплитуда напряжения $U = I R = 360$ кВ (например, применение 4-х

секций по 90 кВ). Данная система кикер-септум позволяет отклонённому пучку обойти габаритные размеры структурных элементов кольца. Длина участка выводу составляет около 10 м. Ловушка (поглотитель пучка) расположена вне габаритов Коллайдера (внутри кольца), представляет собой абсорбер из материала Fe (размер $3 \times 1 \times 1$ м), окружённый бетонной защитой, имеющей характерные размеры 5×6 м.

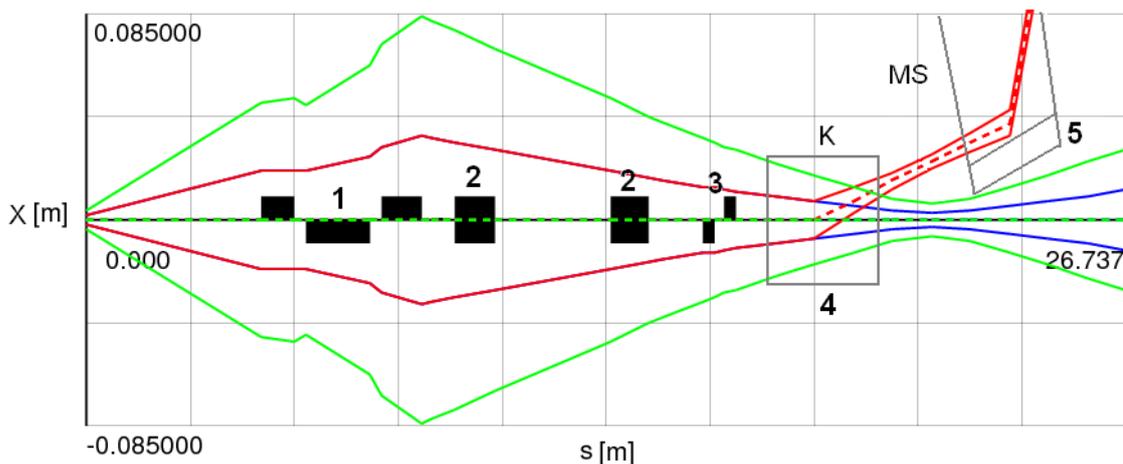


Рис. 7.5.6. Акцептанс кольца, огибающие пучка, расположения элементов на участке сброса пучка

7.6 ВЧ СТАНЦИИ КОЛЛАЙДЕРА

Количество необходимых ВЧ систем Коллайдера, их функции и параметры определяются, главным образом, схемой накопления пучка. Были рассмотрены следующие схемы:

1. Последовательная инжекция, банчей, подготовленных в Нуклотроне, в сепаратрисы Коллайдера.
2. Накопление в Коллайдере небанчируемого пучка с его последующим группированием.

Первая схема требует компрессии сгустка в Нуклотроне т.е. замену его ВЧ станций. Кроме того накладывает жёсткие требования к инжекционному кикеру: Длительность фронтов меньше чем 50 нс. Светимость определяется интенсивностью сгустка на выходе Нуклотрона. Малая величина эмиттанса сгустка за счёт релаксации вызывает большие темпы нагрева поперечной степени свободы. На максимальной энергии требуемые времена охлаждения ~ 100 с. Плюс — в Коллайдере требуется только одна, относительно простая, система ВЧ.

Вторая схема предполагает использование барьерной системы ВЧ, с помощью которой можно регулировать длины областей занимаемых стеком и областью. Область инжекции может быть увеличена до половины периметра Нуклотрона ~ 120 м. Существующую ВЧ систему Нуклотрона можно не менять. Также нет жёстких требований к фронтам инжекционного кикера. Число частиц

в сгустке не зависит от интенсивности импульса инжекции и определяется только временем накопления. Максимум светимости достигается при максимальном эмиттансе. Имеется большой запас по светимости на максимальной энергии. Полученный сгусток будет близок к термодинамическому равновесию. Времена охлаждения ~ 2000 с. Минус — необходимость 3-х систем ВЧ в Коллайдере.

В результате проведённого анализа была выбрана вторая схема с накоплением небанчируемого пучка при помощи барьерной ВЧ системы.

7.6.1 Схема и общие параметры ВЧ-систем при накоплении и подготовки сгустка

Общая схема подготовки пучка в Коллайдере предполагает 3 различных ВЧ системы. Последовательные инжекции частиц из Нуклотрона накапливаются в Коллайдере с помощью барьерной ВЧ системы (ВЧ1). После накопления достаточного числа частиц, барьерная ВЧ система выключается и закорачивается с целью исключения её воздействия на пучок при дальнейшей работе. После распределения пучка по периметру Коллайдера включается гармоническая система ВЧ2, амплитуда которой адиабатически возрастает с начального значения близкого к 0. Формируются 22 сгустка. Процесс сопровождается охлаждением, либо электронным, либо стохастическим. Амплитуда ВЧ2 растёт до того момента, когда сгусток в состоянии «влезть» в сепаратрису 66 гармоники (ВЧ3). В этот момент происходит перезахват сгустка из ВЧ2 в ВЧ3. Осуществляется быстрое выключение и закорачивание ВЧ2, и включение ВЧ3. Процессы формирования сгустков в Коллайдере схематично показаны на Рис. 7.6.1. Показан также результат моделирования процесса перезахвата.

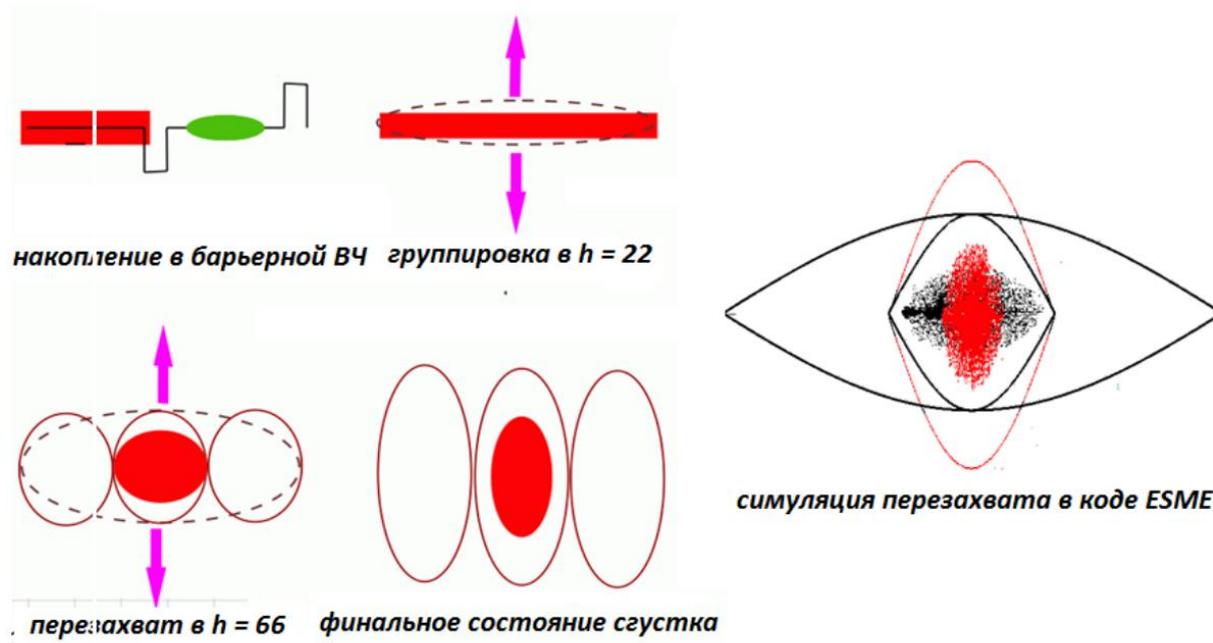


Рис. 7.6.1. Схема накопления и подготовки пучка в Коллайдере для рабочего режима

Моделирование накопления ионов и последующее формирование сгустков проводилось с помощью программ BETACOOl, ESME, а также компьютерного кода, разработанного проф. Т. Катаямой.

Параметры ВЧ систем определяются параметрами сгустка, необходимого для достижения требуемой светимости в Коллайдере — $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Продольный размер сгустка (ср. кв.) был выбран равным 60 см. Импульсный разброс сгустка (ср. кв.) является результатом двух процессов: внутри пучкового рассеяния и охлаждения либо электронного, либо стохастического, и зависит от энергии (Рис. 7.6.2).

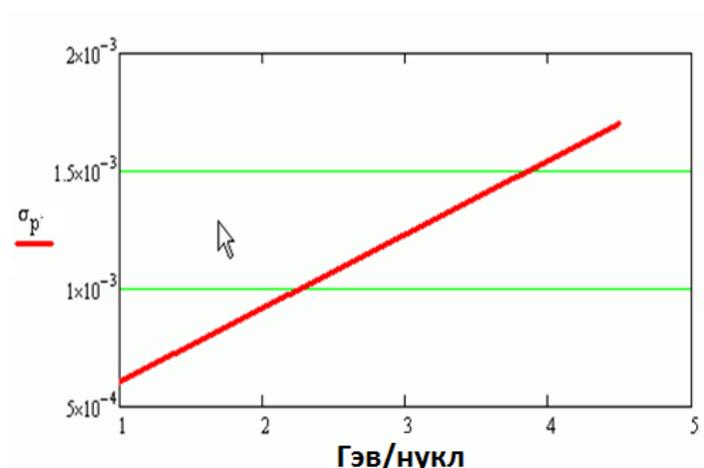


Рис. 7.6.2. Среднеквадратичные размеры сгустка по импульсному разбросу в зависимости от энергии

7.6.2 Выбор кратности ВЧ2

Количество сгустков в Коллайдере определяется расстоянием между сводящими пучки магнитами (размером детектора). Во избежание паразитных столкновений, в зоне детектора должны находиться только 2 соударяющихся сгустка. Для выбранной структуры Коллайдера их должно быть не более 22-х. Следовательно кратность ВЧ2 — 22.

7.6.3 Выбор кратности ВЧ3

Сепаратриса (продольный акцептанс) имеет различные размеры в зависимости от кратности. Ниже, в Таблице 7.6.1 показаны размеры в единицах σ_s и σ_p для энергии 4,5 ГэВ/н.

Таблица 7.6.1. Размеры сепаратрисы

h_3/h_2	Длина в σ_s	Высота в σ_p	$V_{ВЧ}$, кВ
1	±18	±11.5	1723
2	±9	±5.7	861
3	±6	±3.8	574
4	±4.5	±2.9	431
5	±3.6	±2.3	344

Из таблицы видно, что для соотношений свыше 3-х сепаратриса слишком маленькая (продольный акцептанс по импульсу меньше 3σ), а для соотношений менее 3-х слишком большая, при этом, растёт требуемая амплитуда ВЧ напряжения. Оптимальное соотношение кратностей ВЧ2 и ВЧ3 равно 3, следовательно кратность ВЧ — 66.

7.6.4 Выбор требуемой амплитуды ВЧ напряжения

7.6.4.1 Амплитуда барьерной системы

В процессе накопления с движущимися барьерами импульсный разброс сгустка меняется в широких пределах, поэтому было выбрано 5 кВ. Барьеры с такой амплитудой напряжения и фазовой протяжённостью в $\pi/12$ способны удерживать частицы с импульсным разбросом равным акцептансу Коллайдера — $\Delta p/p = 1 \cdot 10^{-2}$.

7.6.4.2 Амплитуда ВЧ3

Амплитуда ВЧ3 полностью определяется размерами сгустка в режиме соударений. Среднеквадратичные размеры сгустка по длине не зависят от энергии — 60 см. Размер по импульсному разбросу в зависимости от энергии показан на Рис. 7.6.2.

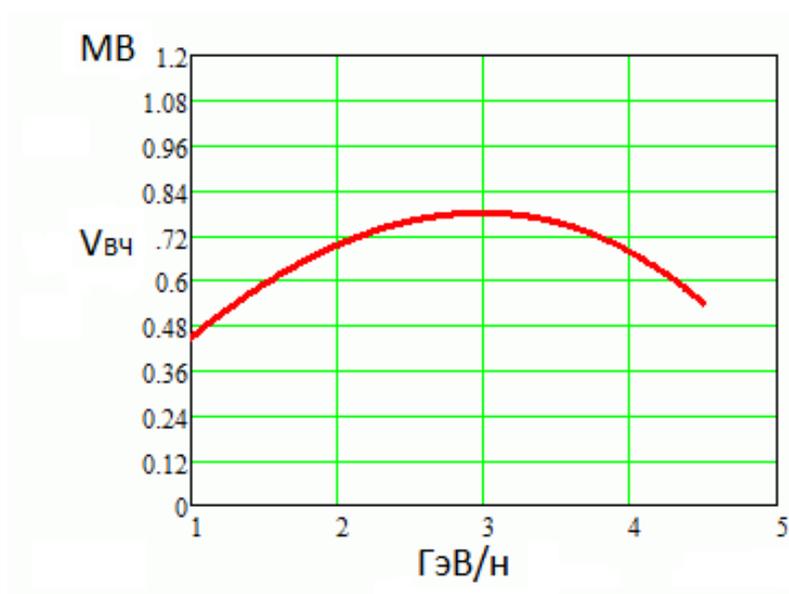


Рис. 7.6.3. Амплитуда напряжения ВЧ3 в зависимости от энергии

7.6.4.3 Амплитуда ВЧ2

ВЧ2 должна сформировать продольный акцептанс больший, чем эмиттанс распущенного после захвата пучка. Накопление ионов в барьерной системе сопровождается охлаждением (электронным или стохастическим). Адиабатический захват в ВЧ2 тоже сопровождается охлаждением и эмиттанс пучка уменьшается. Напряжение ВЧ2 было выбрано таким, чтобы

аксептанс был равен эмиттансу распущенного пучка до начала процесса захвата, что соответствует 100 кВ.

7.6.5 Барьерная ВЧ система

7.6.5.1 Параметры пучка

Параметры барьерной ВЧ системы зависят от параметров сформированного Нуклотроном сгустка, а также количества ионов, которое необходимо накопить. Эти параметры приведены в Таблицах 7.6.2 и 7.6.3.

Таблица 7.6.2. Размеры банча после Нуклотрона

Энергия, ГэВ/н	1	4,5
Количество ионов Au ⁷⁹⁺	1 ÷ 1,1·10 ⁹	1 ÷ 1,1·10 ⁹
Ср. кв. длина банча, м	5,9 ÷ 17,5	2,5 ÷ 6,2
Ср. кв. имп. разброс, 10 ⁻⁴	2,8 ÷ 0,95	2,1 ÷ 0,85
Длина инж. банча (6σ), м	35,4 ÷ 105	15 ÷ 37,2
Длина инж. банча (6σ), нс	120 ÷ 354	50 ÷ 125

Таблица 7.6.3. Количество ионов в Коллайдере

Энергия, ГэВ/н	1	3	4,5
Количество ионов (всего)	0,6·10 ¹⁰	5,3·10 ¹⁰	4,8·10 ¹⁰
Количество ионов на банч (22)	2,75·10 ⁸	2,4·10 ⁹	2,2·10 ⁹

7.6.5.2 Схема работы и общие требования

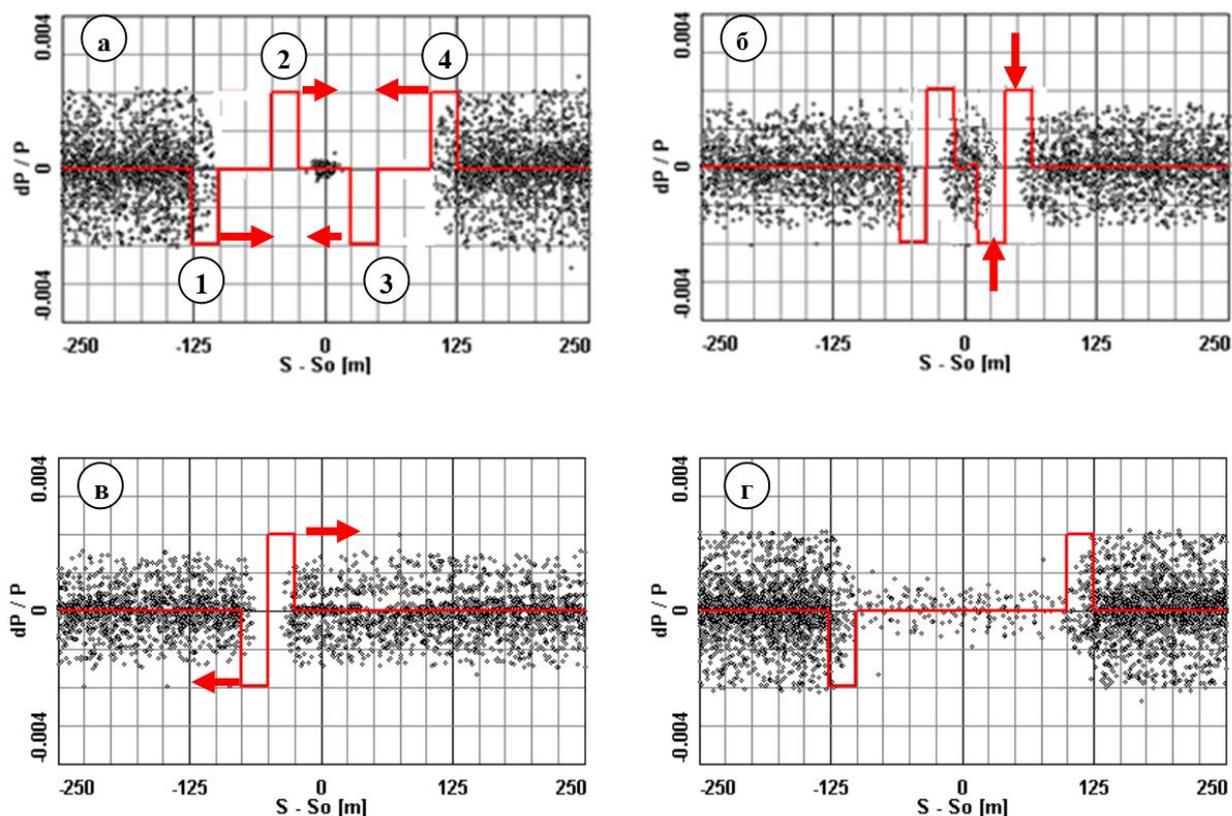


Рис. 7.6.4. Распределение частиц и положение барьеров во время процесса накопления: а) очередная инжекция, б) положение барьеров перед сливанием банчей, в) барьеры начинают освобождать место для новой инжекции, г) барьеры раздвинуты, после инжекцией должны появиться барьеры 2 и 3

При разработке технического проекта на барьерную систему Коллайдера ОИЯИ и ИЯФ согласились в качестве «базовой» принять схему накопления с 4-я движущимися барьерами, представленную на Рис. 7.6.4.

В момент инжекции очередного банча из Нуклотрона зона накопления (стека) должна занимать половину периметра, или $800 \div 900$ нс. Зона накопления образуется 2-я импульсами 1-м и 4-м. В момент инжекции импульсы должны быть раздвинуты по фазе на половину периода обращения ($800 \div 900$ нс) чтобы избежать воздействия на зону накопления инжекционным кикером. Два других импульса 2-й и 3-й формируют «зону инжекции», таким образом, что инжекция осуществляется в устойчивую область синхротронного движения — «потенциальную яму». Расстояние между барьерами должно соответствовать реальной протяжённости банча, выдаваемой сигналом датчика тока в Нуклотроне непосредственно перед переводом пучка. Синхронизация 2-го и 3-го импульсов производится электроникой Нуклотрона. После инжекции (Рис. 7.6.4 а) барьеры 1 и 2 начинают двигаться навстречу друг к другу с соблюдением адиабатичности процесса. Барьеры 2 и 3 двигаются навстречу друг к другу с целью выравнивания импульсных разбросов в зоне накопления и в зоне

инжекции (положение Рис. 7.6.4 б). Находясь в положение 1б барьеры 3 и 4 выключаются и новая порция вливается в накопленный пучок, образуя положение Рис. 7.6.4 в. После этого барьеры 1 и 2 раздвигаются, освобождая место для новой инъекции (Рис. 7.6.4 г). Перед новой инъекцией устанавливаются барьеры 2 и 3 для приёма нового сгустка.

7.6.5.3 Ограничения на параметры барьерной ВЧ

1. Суммарная рассеиваемая мощность барьерной системы ограничена ~ 21 кВт (эквивалент 2-х импульсов по 5 кВ, длительностью $\pi/6$ каждый или 4-х импульсов по 5 кВ, длительностью $\pi/12$).
2. Протяжённость фронтов барьеров ~ 10 нс.
3. Амплитуда всех 4-х барьеров при накоплении одинакова (желательное условие), если для их формирования используются одни и те же секции.
4. Возможно формирование импульсов разной амплитуды. Для этого будет необходимо использовать регулируемый источник питания.
5. Параметры банча в Нуклотроне перед инъекцией в Коллайдер и количество ионов приведены в Таблицах 7.6.2 и 7.6.3.
6. Максимальное напряжение барьеров — 5 кВ, ускоряющего меандра — 300 В.
7. Скорость подъёма поля при ускорении не более 0,024 Тл/с. Время ускорения с 1 ГэВ/н до 4,5 ГэВ/н — больше 51,25 с.

7.6.5.4 Техническое исполнение барьерной ВЧ

Барьерная станция — коаксиальная линия, наполненная кольцами из аморфного железа марки 5ТМ. Длина линии — 0,9 м. На кольца от источников напряжений с помощью транзисторов DRF1201, работающих в ключевом режиме, поступают напряжения. Эти напряжения на разомкнутой части коаксиальной линии образуют последовательность напряжений +5 кВ; 0 В; -5 кВ; 0 В соответствующей длительности. В разрыве вакуумной камеры каждого кольца располагается керамический цилиндрический изолятор. К разрыву вакуумной камеры подсоединяются разомкнутые части коаксиальной линии.

Барьерная станция располагается на подставке длиной 1800 мм. На части вакуумной камеры ускорителя, которые располагаются под коаксиальными линиями барьерной и импульсной ускоряющей станции, наматывается нагревательный кабель. Между этим кабелем и внутренними цилиндрами коаксиальных линий станций должна располагаться термоизоляция. Нагревательный

кабель используется для прогрева вакуумной камеры во время получения необходимого вакуума. Барьерная станция имеет вакуумный насос МРН250. На концах вакуумной камеры, которая проходит через барьерную станцию, располагаются два вакуумных шибера (Рис. 7.6.5).

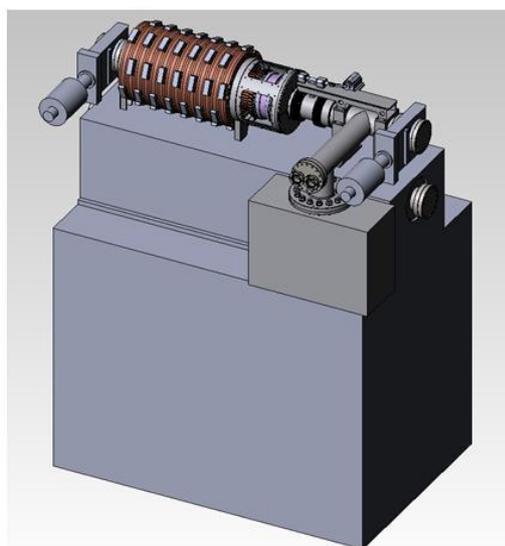
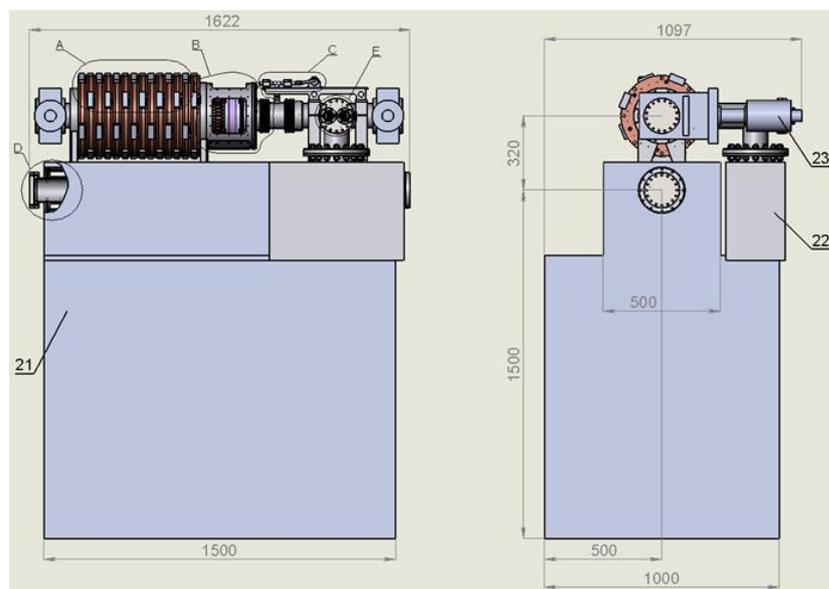


Рис. 7.6.5. Эскиз барьерной системы

Её элементы размещаются на подставке (21) и содержат следующие основные узлы:

Резонатор (А), изолятор и механический замыкатель (В), его привод (С) и детали вакуумной системы — насос (22), шибер (23) и манометрическую лампу (Е).

Резонаторы барьерной системы будут выполнены с использованием колец, намотанных лентой из аморфного железа марки 5В-М. Этот материал имеет удачное сочетание свойств — высокой индукции насыщения (1,3 Тл), магнитной проницаемости (~ 60000). Весь резонатор набирается из 14 секций, причём 2 из них используются для ускорения и на них подаётся напряжение частотой

522,5 ÷ 587,2 кГц, по форме — меандр. Суммарная амплитуда меандра, набираемого на 2 резонаторах 300 В. Остальные 12 резонаторов являются собственно резонаторами барьерной системы и на них подаются двухполярные импульсы той же частоты. Суммарная амплитуда импульсов, набираемых на 12 резонаторах ±5 кВ. Сердечники секций имеют кольцевую форму, размером 260 × 200 × 15 мм. Основные параметры резонатора барьерной системы Коллайдера сведены в Таблицу 7.6.4.

Таблица 7.6.4. Параметры резонаторов барьерной системы Коллайдера

Параметр	Значение
β релятивистское	0,87 ÷ 0,985
Изменение частоты (меандр)	522 ÷ 587 кГц
Изменение частоты	~ 65 кГц (~11 %)
Изменение энергии Au ⁷⁹⁺	1 ÷ 4,5 ГэВ/н
Шунтовое сопротивление (R_e)	4,2 ÷ 6,3 Ом
Макс. ускоряющее напряжение (2 секции резонатора — кольца)	300 В
Максимальное напряжения для барьерного накопления (12 секций резонатора — кольца)	5 кВ
Мощность ВЧ потерь	~ 21 кВт

Секции резонатора однотипны и изображены на Рис. 7.6.6.

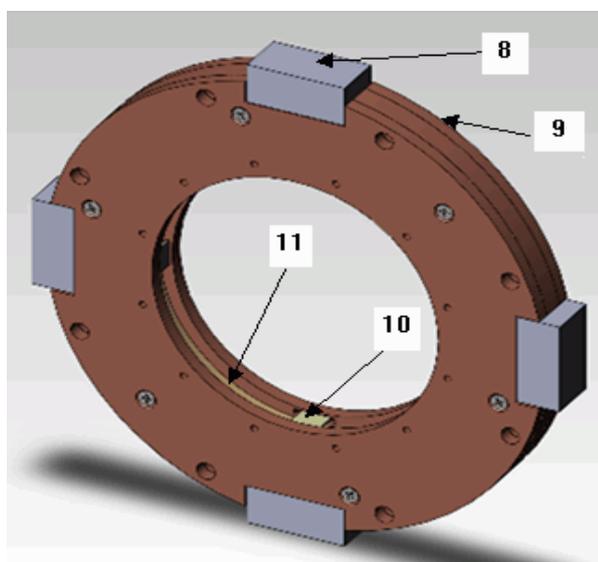
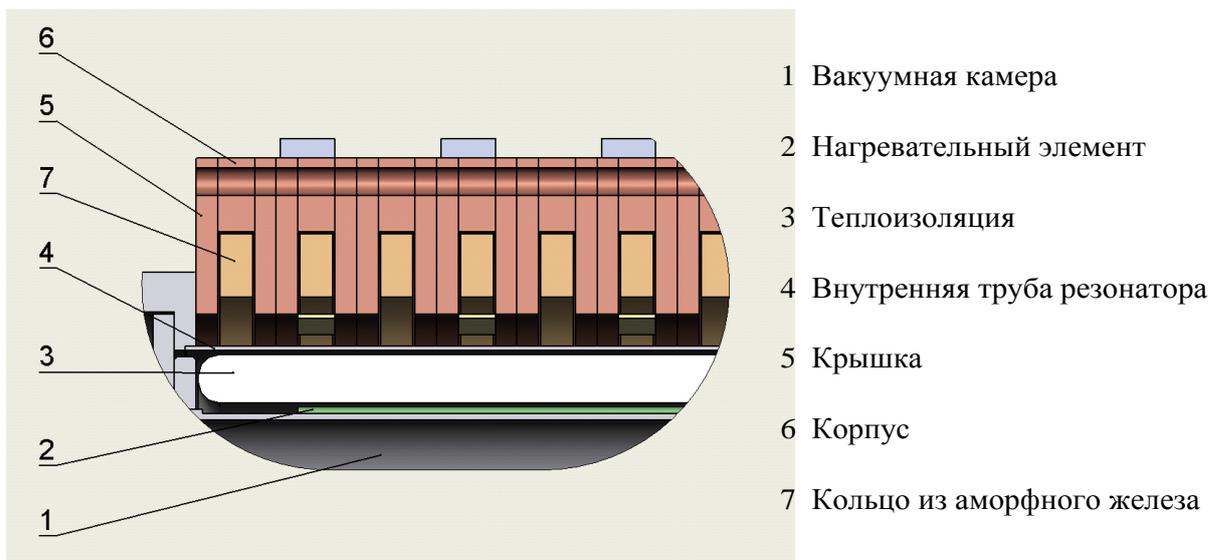


Рис. 7.6.6. Секции резонатора барьерной системы. 8 — Коробка с электронными ключами, 9 — Крышка, 10 — Обмотка возбуждения, 11 — Кольцо из аморфного железа

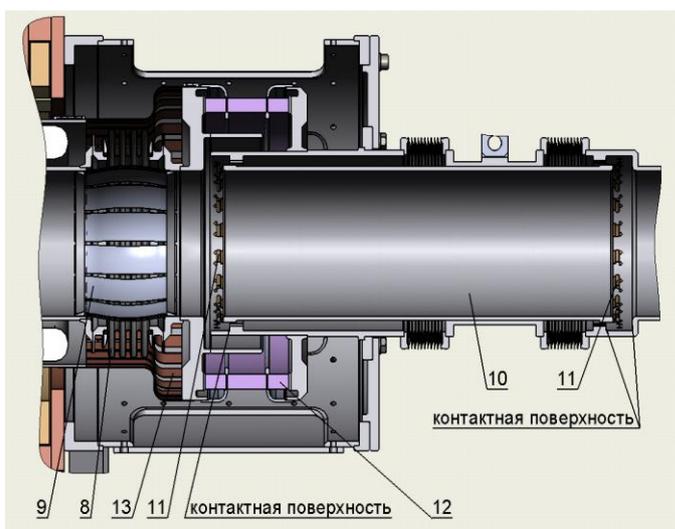
Вакуумная камера (1) внутри резонатора окружена нагревательным элементом (2). Нагреватель отделен от резонатора теплоизолирующим слоем (3). Электрическое замыкание внутренней части резонатора с ускоряющим зазором выполнено с помощью трубы (4). Для охлаждения барьерной системы ускорителя каждый сердечник помещён в медный кожух, образуемый крышками (5) и корпусом (6). Теплоотвод от самого кожуха выполняется с помощью воды. Суммарная мощность, снимаемая охлаждающей жидкостью, со всех 14 секций составляет 21 кВт.

Каждая секция резонатора имеет четыре петли связи для подключения усилителей. Выполнены они с использованием транзисторных ключевых SMOS-приборов DRF1203 (производство фирмы Microsemi, США). Основные параметры этого ключа:

1. Предельное напряжение 1 кВ;
2. Предельный ток 12 А;
3. Сопротивление в открытом состоянии 0,9 Ом;
4. Скорость включения/выключения $3 \div 4$ нс;
5. Предельная мощность рассеяния 560 Вт;

Конструктивно к резонаторам барьерной системы прилегают: керамический изолятор, отделяющий вакуумную камеру от резонатора, механический короткозамыкатель с приводом, а также части, принадлежащие вакуумной системе — нагреватель для обезгаживания, шиберы и вакуумный магниторазрядный насос. Для исключения механических напряжений и перемещения узлов внутри вакуумного объёма, используются сильфоны из нержавеющей стали.

Участок с ускоряющим зазором показан на Рис. 7.6.7.



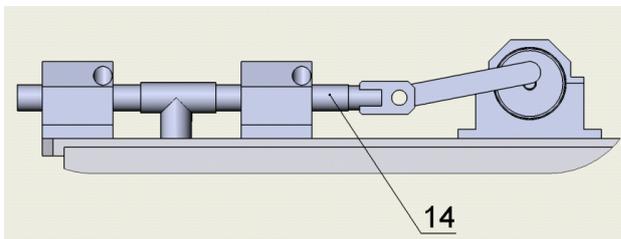
- 8 Сильфон развязывающий
- 9 Экран сильфона
- 10 Замыкатель ускоряющего зазора
- 11 Пружинные контакты (показаны в среднем положении)
- 12 Керамический изолятор
- 13 Проводящие перемычки

Рис. 7.6.7. Часть резонатора с ускоряющим зазором

Для снятия возможных механических напряжений с керамического изолятора (12) ускоряющего зазора, это место отделено развязывающим сильфоном (8), который с внутренней части вакуумной камеры блокируется экраном, набранным из гибких металлических полос (9). Электрическое соединение внутренней трубы резонатора (4) с ускоряющим промежутком выполнено с помощью проводящих перемычек (13). Для закорачивания ускоряющего промежутка барьерной системы в то время, когда она не работает, используется механический замыкатель (10), представляющий из

себя перемещаемую вдоль оси вакуумной камеры трубу, имеющую на концах пружинные контакты (11). Покрытие контактов обеспечивает несвариваемость поверхностей в условиях вакуума.

Узел перемещения замыкателя показан на Рис. 7.6.8.



14 Механизм перемещения замыкателя

Рис. 7.6.8. Узел замыкателя

7.6.5.5 Моделирование накопления в Барьерной системе

Численное моделирование накопления ионов в барьерной ВЧ системе было проведено с помощью кода ВЕТАСОOL и кода, разработанного проф. Т. Катаямой. Моделирования показали близкие результаты с достаточно высокой эффективностью процесса накопления Рис. 7.6.9.

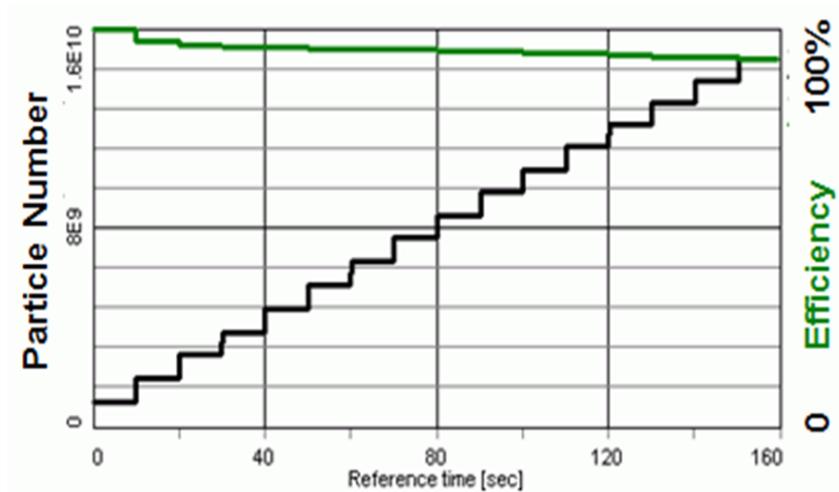
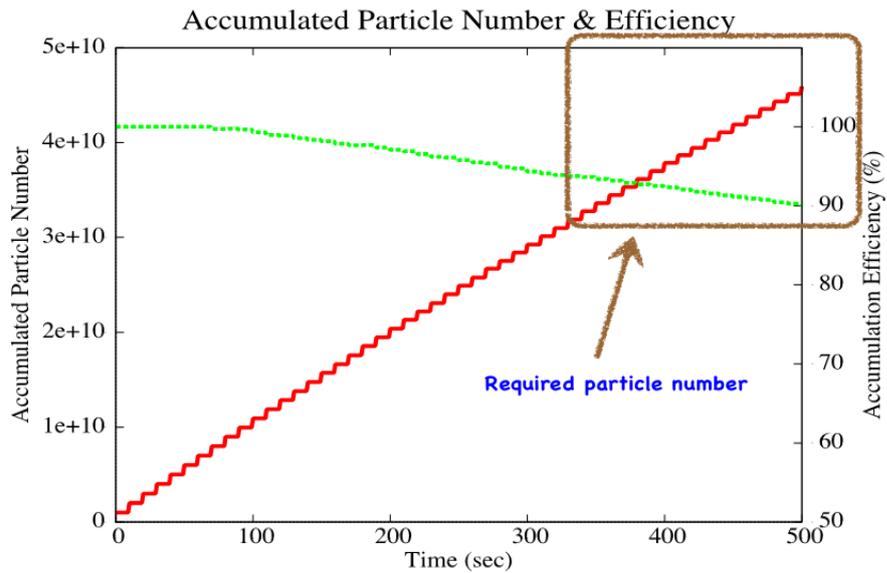


Рис. 7.6.9. Количество накопленных частиц и эффективность накопления на энергии 1,5 ГэВ/н. Код проф. Т. Катаямы
вверху и BETACOOOL внизу

Было показано, что для накопления необходимого числа ионов достаточно ~ 200 с в диапазоне энергий $1 \div 2.5$ ГэВ/н, несмотря на то, что эффективность накопления существенно падает с увеличением энергии: 92 % при 1.5 ГэВ/н, 67 % при 2,5 ГэВ/н. Равновесие между охлаждением и внутри пучковым рассеянием достигается при ср. кв. импульсном разбросе в $2 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 7.6.5. Накопление с электронным охлаждением в Коллайдере

Энергия ионов, ГэВ/н	1,5	2,5	4,5
Высота барьера $\Delta p/p$, 10^{-3}	0,87	1,08	2
Темп электронного охлаждения, c^{-1}	1,0	0,25	0,03
Эффективность накопления без охлаждения, %	68	70	74
Эффективность накопления с охлаждением, %	93	91	93

7.6.6 Гармонические системы Коллайдера ВЧ2 и ВЧ3

7.6.6.1 Обоснование выбора типа резонаторов

Согласно техническим требованиям к ВЧ системам Коллайдера максимальное ускоряющее напряжение на двадцать второй гармонике частоты обращения частиц ($11,484 \div 12,914$ МГц) должно быть 100 кВ, а на шестьдесят шестой гармонике ($34,452 \div 38742$ МГц) — 1000 кВ. Ускоряющие резонаторы должны располагаться между вакуумными камерами верхнего и нижнего кольца Коллайдера. Расстояние между осями вакуумных камер — 320 мм. Внутренний диаметр вакуумных камер — 100 мм. Резонаторы 22-ой гармонике в каждом кольце Коллайдера должны занимать вдоль оси вакуумных камер не более пяти метров, а резонаторы 66-ой гармонике — девяти метров.

1. Единственное техническое решение в данной ситуации — это применение в ускоряющих системах вакуумных коаксиальных резонаторов, укороченных ёмкостью. Все резонаторы будут иметь длину по оси порядка одного метра с ускоряющим зазором посередине. Максимальное напряжение на резонаторе двадцать второй гармонике — 25 кВ, а на резонаторе шестьдесят шестой гармонике — 125 кВ. Зазор в укорачивающей ёмкости первого резонатора — 4 мм, а во втором — 25 мм. Напряжённость электрического поля в регулярной части укорачивающей ёмкости первого резонатора — 62,5 кВ/см, второго — 50 кВ/см.
2. Малые габаритные размеры дают возможность сделать резонаторы достаточно жёсткими. Это позволяет избежать статическую электромеханическую неустойчивость стенок резонатора при рабочих напряжениях.
3. В связи с тем, что все размеры резонаторов значительно меньше рабочей длины волны, их высшие резонансные моды расположены выше 430 МГц. Если сгустки пучка гауссовские, то и спектр его гауссовский. Если среднеквадратичный продольный размер сгустков — 60 см, то этому размеру соответствует ширина спектра на уровне 0,606 от максимальной амплитуды спектра равная ~ 70 МГц. Шунтовые сопротивления высших мод в окрестности 430 МГц для резонаторов 66-й гармонике порядка 2 кОм. Если частоты этих мод совпадут для резонаторов одной дорожки Коллайдера, то из-за взаимодействия сгустков пучка этой дорожки с этими резонаторами может появиться инкремент для когерентных синхротронных колебаний порядка 10^{-4} с^{-1} . Влияние других более высокочастотных резонансных мод менее заметно. Дипольные резонансные моды. Можно сказать, что резонаторы — одномодовые.

7.6.6.2 Система Коллайдера ВЧ2

Таблица 7.6.6. Параметры системы Коллайдера

Параметр ВЧ системы	Значение параметра
Частота обращения	522 ÷ 587 кГц
Кратность рабочей частоты	22
Рабочая частота	11,484 ÷ 12.914 МГц
Полное напряжение	100 кВ
Ток пучка	0,4 А
Количество резонаторов	4
Напряжение на одном резонаторе	25 кВ

Резонаторы будут сгруппированы парами. Каждая пара резонаторов будет располагаться на общей подставке. Габариты сборки из двух резонаторов для нижнего и верхнего колец приведены на Рис. 7.6.10 и Рис. 7.6.11.

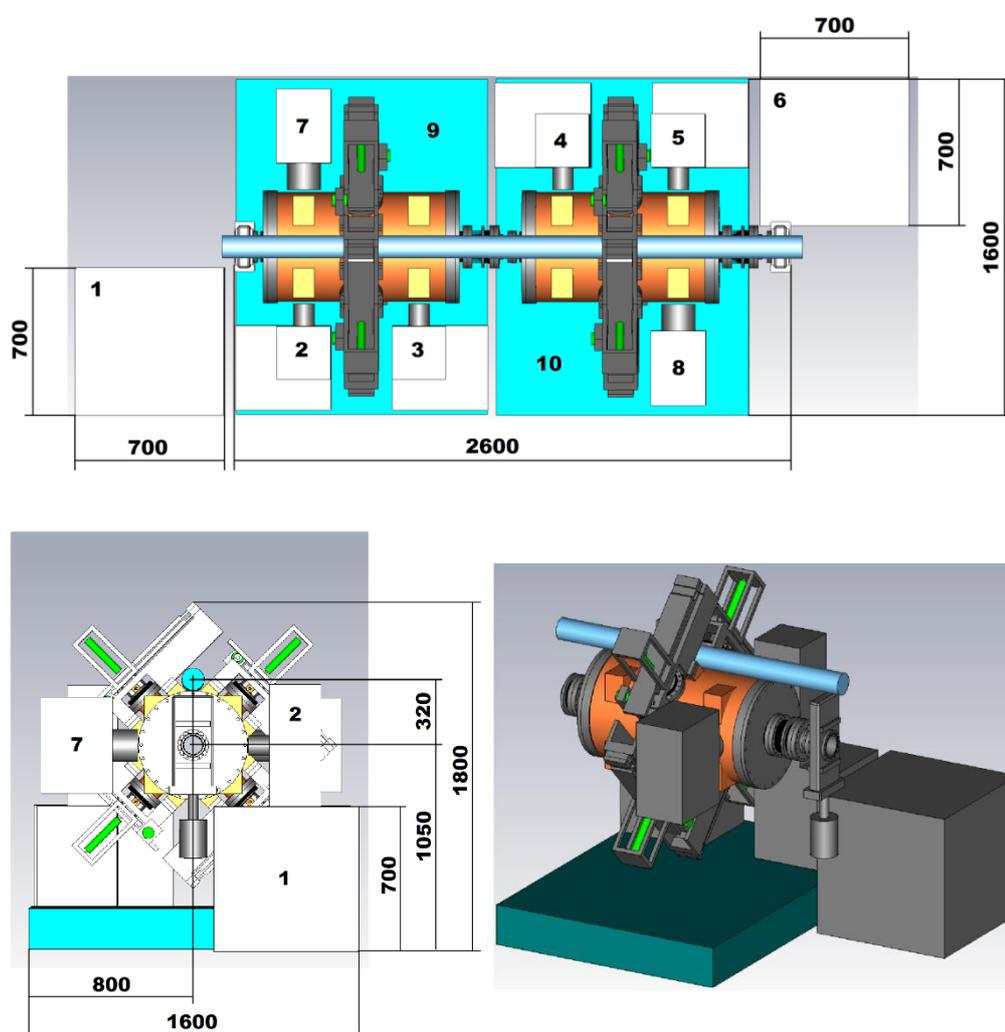


Рис. 7.6.10. Габаритные размеры и эскиз ускоряющих резонаторов ВЧ системы № 2 для нижнего кольца Коллайдера: 1, 6 — стойки системы воздушного охлаждения генераторов; 2, 3, 4, 5 — ВЧ генераторы; 7, 8 — вакуумные насосы; 9, 10 — подставки

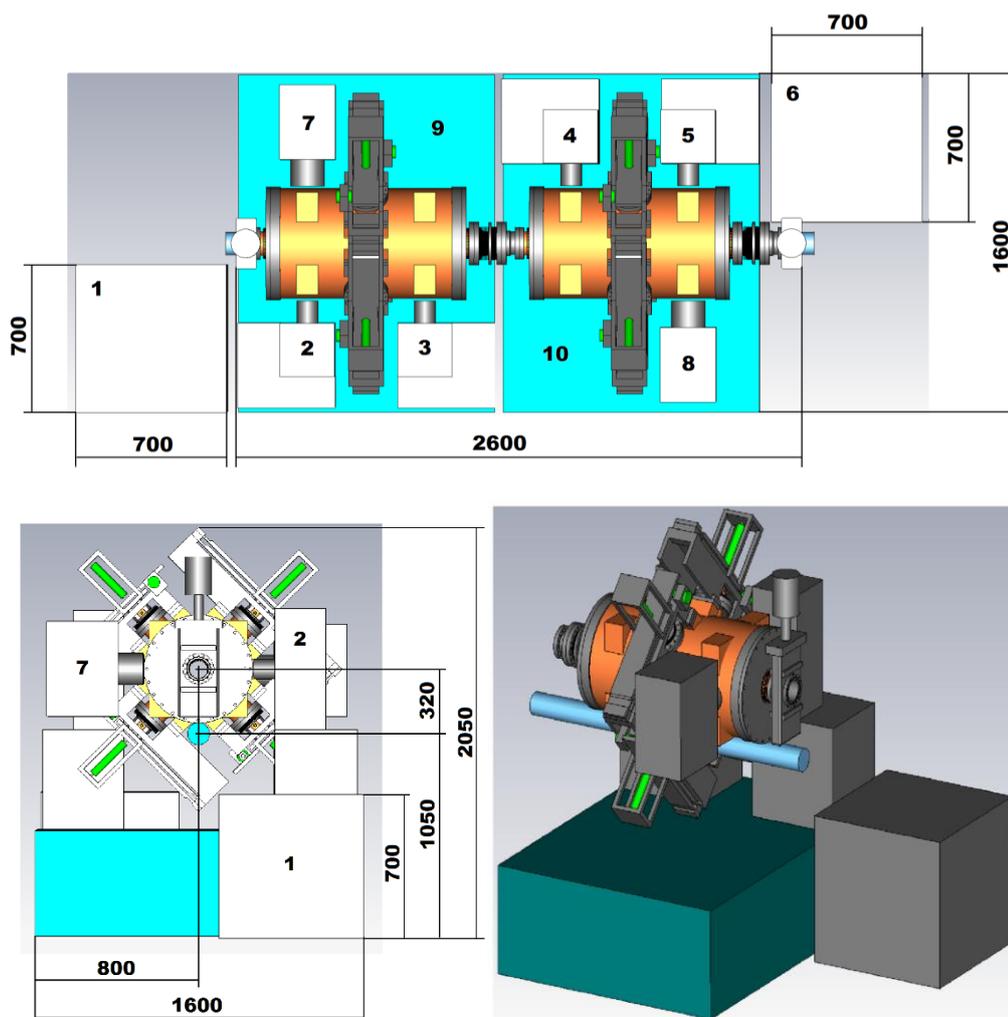


Рис. 7.6.11. Габаритные размеры и эскиз ускоряющих резонаторов ВЧ системы № 2 для верхнего кольца Коллайдера:
 1, 6 — стойки системы воздушного охлаждения генераторов; 2, 3, 4, 5 — ВЧ генераторы; 7, 8 — вакуумные насосы; 9,
 10 — подставки

Таблица 7.6.7. Параметры резонатора ВЧ2

Параметр резонатора	Значение
Рабочая частота	11,484 ÷ 12,914 МГц
Перестройка рабочей частоты	~ 1,9 МГц
Характеристическое сопротивление	15,4 ÷ 17,3 Ом
Собственная добротность ($Q_{SLANS} \cdot 0,8$)	3570 ÷ 3750
Шунтовое сопротивление	54,8 ÷ 65,0 кОм
Ускоряющее напряжение	25 кВ
Ток пучка	0,4 А
Мощность ВЧ потерь	5,7 ÷ 4,8 кВт

7.6.6.3 Система Коллайдера ВЧЗ

Таблица 7.6.8. Параметры резонатора ВЧЗ

Параметр резонатора	Значение ($\beta = 0,877 \div 0,985$)
Рабочая частота	34,452 ÷ 38,742 МГц
Перестройка рабочей частоты	~ 4,3 МГц (~ 12 %)
Характеристическое сопротивление	36,853 ÷ 42,51624 Ом
Собственная добротность ($Q_{SLANS} \cdot 0,8$)	5494 ÷ 5816
Шунтовое сопротивление	252 ÷ 304 кОм
Максимальное ускоряющее напряжение	125 кВ
Максимальный ток пучка	0,4 А
Максимальная мощность ВЧ потерь ($P_{SLANS}/0,8$)	38,6 ÷ 32,1 кВт
Габариты: диаметр/длина с учётом стенок 15 мм	520/750 мм

Эксперименты с ионами проводятся на энергиях 1000 ÷ 4500 МэВ/н. Этому соответствует изменение параметра β в пределах 0,877 ÷ 0,985 и частоты обращения ионов в диапазоне 522 ÷ 587 кГц. Резонатор настраивается на частоту 66 гармоники частоты обращения (34,452 ÷ 38,742 МГц). Настройка производится изменением ёмкости между цилиндром и сегментами тюнеров (Рис. 7.6.12). Четыре сегмента тюнеров, симметрично расположенные по азимуту вокруг цилиндров, синхронно перемещаются в радиальном направлении. Перемещение механической перестройки — 8,4 мм. Характеристики резонатора, приведенные в Таблице 7.6.8, указаны для двух крайних значений β приведены эффективные импедансы с учётом коэффициента пролёта.

Таблица 7.6.9. Характеристики монополярных мод резонатора

$\beta = 0,877$				$\beta = 0,985$			
F, МГц	ρ , Ом	ρ , кОм	Q	F, МГц	ρ , Ом	ρ , кОм	Q
37,58339	36,853	252,1	6868	42,51624	41,86	304	7270
439,1537	0,239	1,5	6082	448,8326	0,157	2,0	12580
452,8919	0,077	1,1	13881	461,5183	1,419	5,4	3800
533,7109	10,112	60	5938	508,6281	6,31	36	5697
852,0069	2,369	39	16412	845,7928	3,98	65,6	16490

В Таблице 7.6.10 приведены характеристики синфазных мод. Из-за зеркальной симметрии резонатора, эти моды имеют ничтожные импедансы. Влияние нарушения симметрии моделировалось смещением ёмкостных сегментов параллельно оси. В столбцах приведены эффективные характеристические импедансы $\rho_{несим}$ для смещения 1 мм.

Таблица 7.6.10. Характеристики монополюсных (синфазных) мод резонатора

$\beta = 0,877$				$\beta = 0,985$			
F , МГц	ρ , Ом	$\rho_{\text{несимм}}$, Ом	Q	F , МГц	ρ , Ом	$\rho_{\text{несимм}}$, Ом	Q
47,10234	$1,4 \cdot 10^{-16}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	7876	59,0437	$7 \cdot 10^{-17}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	8860
440,8700	$2,6 \cdot 10^{-19}$	0,066	6402	449,4788	$1 \cdot 10^{-14}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	16404
453,4763	$4 \cdot 10^{-20}$	0,021	12344	469,7503	$2 \cdot 10^{-13}$	0,124	3023
825,7762	$6 \cdot 10^{-16}$	$4 \cdot 10^{-7}$	11441	790,6847	$7 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-8}$	12339
901,5797	$5 \cdot 10^{-19}$	$6 \cdot 10^{-4}$	26879	900,2089	$3 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^{-4}$	29087

В Таблице 7.6.11 приведены характеристики дипольных мод. Все частоты высших мод находятся за пределами спектра тока сгустков, поэтому бетатронные колебания не возбуждаются в Коллайдере.

Таблица 7.6.11. Спектр дипольных мод в резонаторе ВЧЗ

$\beta = 0,877$			$\beta = 0,985$		
F , МГц	Q	R/Q , Ом/м	F , МГц	Q	R/Q , Ом/м
514,9	6289	1310	476,1	7215	2298
555,9	8025	1203	582,6	2,553e+004	47,73
586,8	2,65e+004	10,48	611,9	1,066e+004	64,73
780,9	8109	725	721,6	9805	694,1
924,6	1,655e+004	568,9	922,2	1,578e+004	1557
959,8	3,29e+004	0,1707	959,8	3,295e+004	0,2795

7.6.6.4 Конструкция резонатора

На Рис. 7.6.12 показаны технические решения в конструкциях отдельных узлов резонатора.

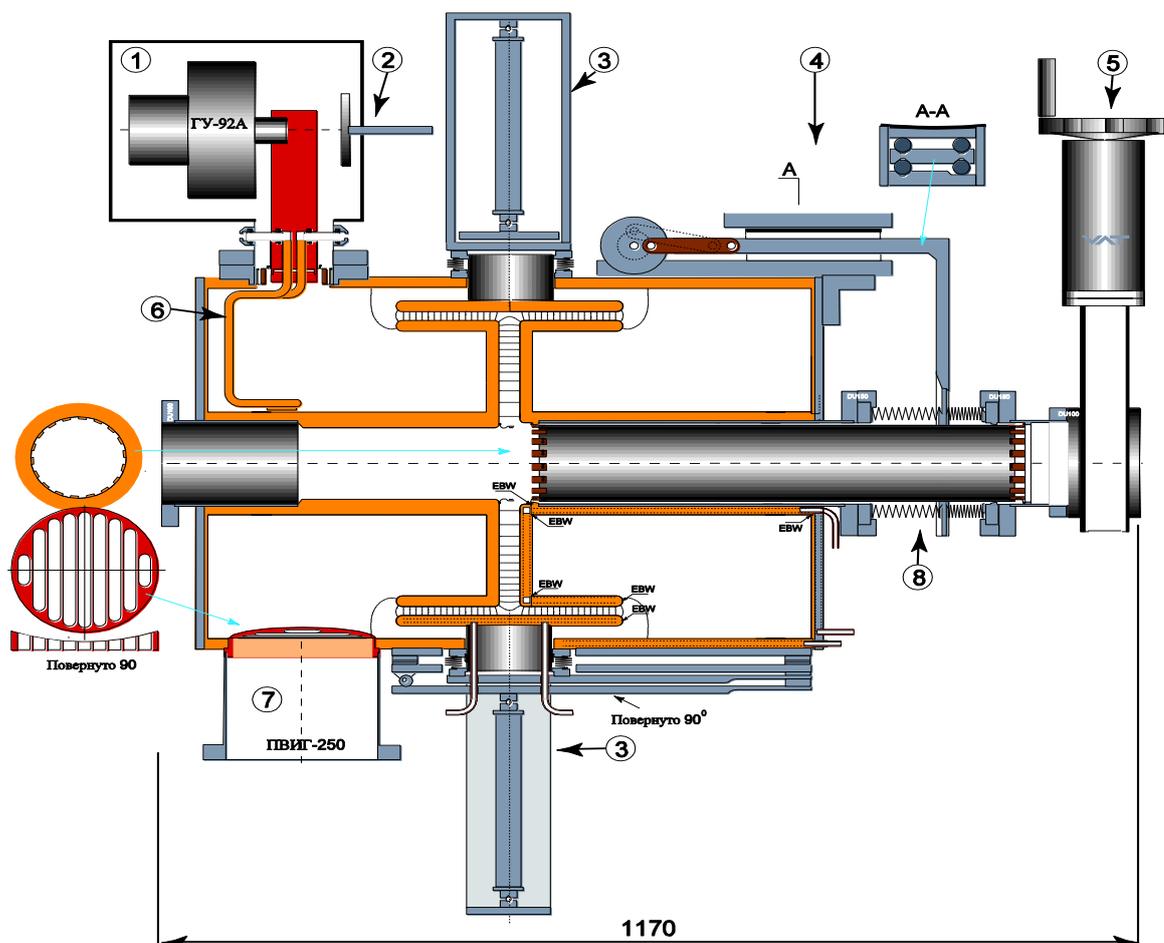


Рис. 7.6.12. Конструкция резонатора станции № 3. 1 — ВЧ генератор на лампе ГУ-92А; 2 — отстройка частоты паразитного резонанса; 3 — безлюфтовый механизм перестройки основной рабочей частоты; 4 — механизм электрического закорачивания ускоряющего зазора; 5 — вакуумный шибер; 6 — водоохлаждаемая петля ввода ВЧ мощности; 7 — патрубок магниторазрядного насоса; 8 — сифонный узел механизма закоротки ускоряющего зазора

7.6.7 Динамика $^{197}\text{Au}^{78+}$ ионов в Коллайдере

Ионы $^{197}\text{Au}^{78+}$ образуются в результате рекомбинации ионов $^{197}\text{Au}^{79+}$ с электронами охлаждения в электронном кулере Коллайдера. Часть ионов оказывается вовлечённой в синхротронное движение, другая часть движется в ионопроводе вне сепаратрис. Большинство этих ионов продолжают существовать до следующей рекомбинации до состояния $^{197}\text{Au}^{77+}$. После последней рекомбинации эти ионы покидают акцептанс ускорителя.

Для достижения требуемой светимости необходимо соблюдение следующих параметров сгустка: ср. кв. длина — 0,6 м, ср. кв., импульсный разброс линейно пропорционален релятивистской гамме и варьируется от $6 \cdot 10^{-4}$ при 1 ГэВ/н до $1,7 \cdot 10^{-3}$ при 4,5 ГэВ/н. Высота сепаратрисы, в единицах

импульсного разброса (ср. кв.), постоянна и не зависит от энергии и равна $\sim 3.7\sigma_p$. Размеры вакуумной камеры в горизонтальном плане — 0.06 м. На Рис. 7.6.13 показано соотношение разности синхронных энергий Au^{79+} и Au^{78+} (центры соответствующих сепаратрис) к высоте сепаратрисы.

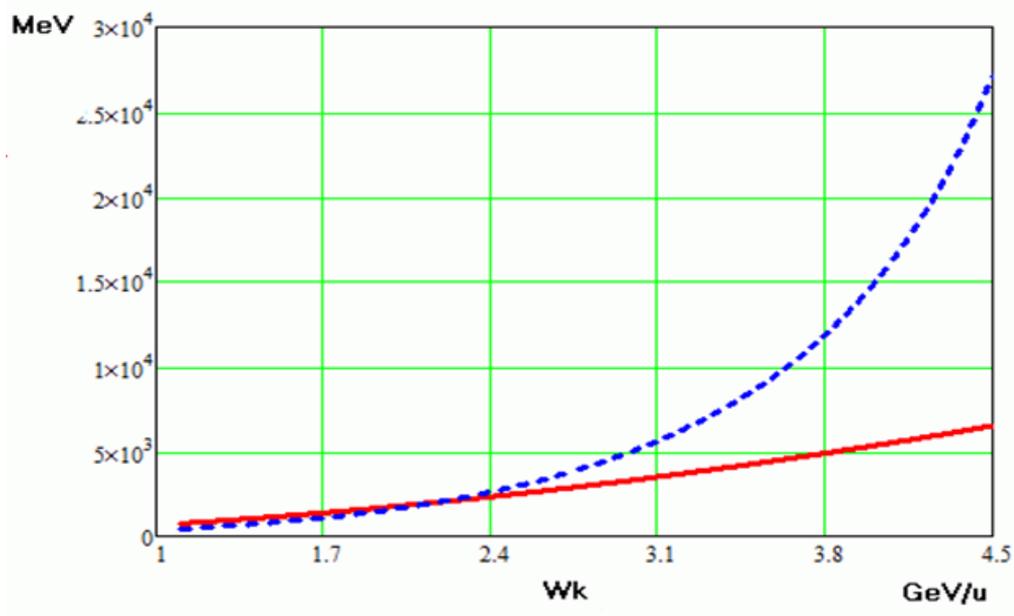


Рис. 7.6.13. Высота сепаратрисы (красный) и сдвиг по энергии между синхронными Au^{79+} и Au^{78+} в зависимости от энергии

Сепаратрисы разных зарядностей расходятся друг от друга по мере роста энергии. Графически ситуацию можно представить следующим образом:

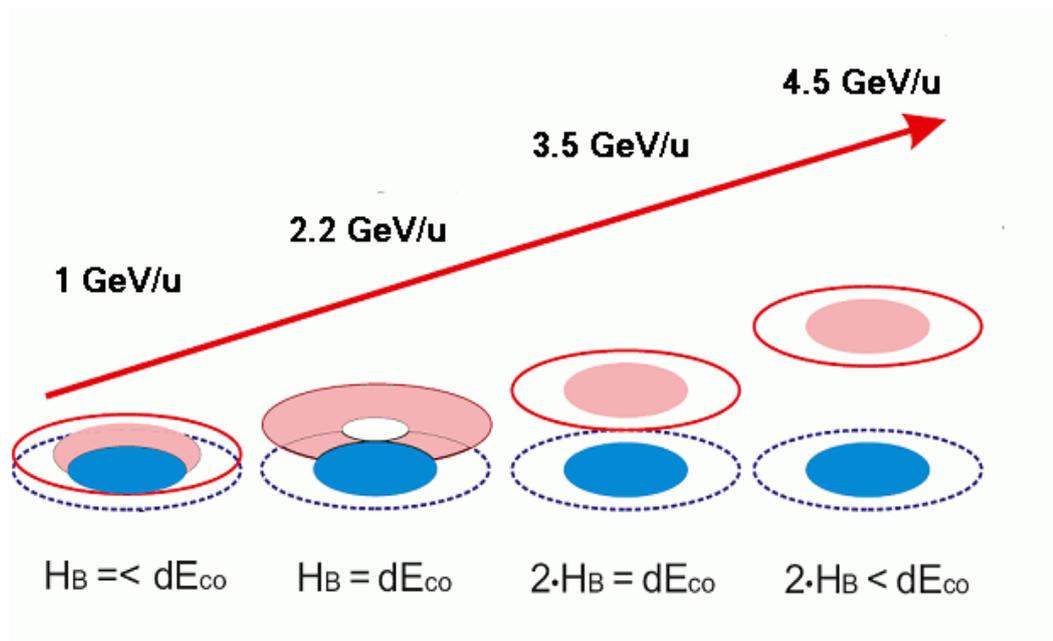


Рис. 7.6.14. Общая схема относительного расположения сепаратрис Au^{79+} (голубой) и Au^{78+} (красный) в продольном фазовом пространстве

Таким образом, образующиеся в результате рекомбинации ионы могут оказаться в или вне сепаратрисы в области энергий $1 \div 3,5$ ГэВ/н. При этом частицы оказавшиеся внутри сепаратрисы вовлечены в синхротронное движение относительно новой орбиты. Частицы, образовавшиеся вне сепаратрисы, движутся вдоль траекторий параллельных дисперсионной орбите. Дисперсионная орбита — это траектория, изначально синхронной Au^{79+} после её рекомбинации с электроном в кулере и оказавшейся вне новой сепаратрисы. Радиальный сдвиг равен: $\Delta R = D_x \Delta Z / Z_0$, где D_x — дисперсия, ΔZ — изменение заряда.

Траектории движения прочих частиц параллельны дисперсионной орбите а их положения зависит от их импульса в момент рекомбинации. Ион будет жить внутри вакуумной камеры до тех пор, пока его траектория не пересечёт апертуру в месте максимума дисперсии.

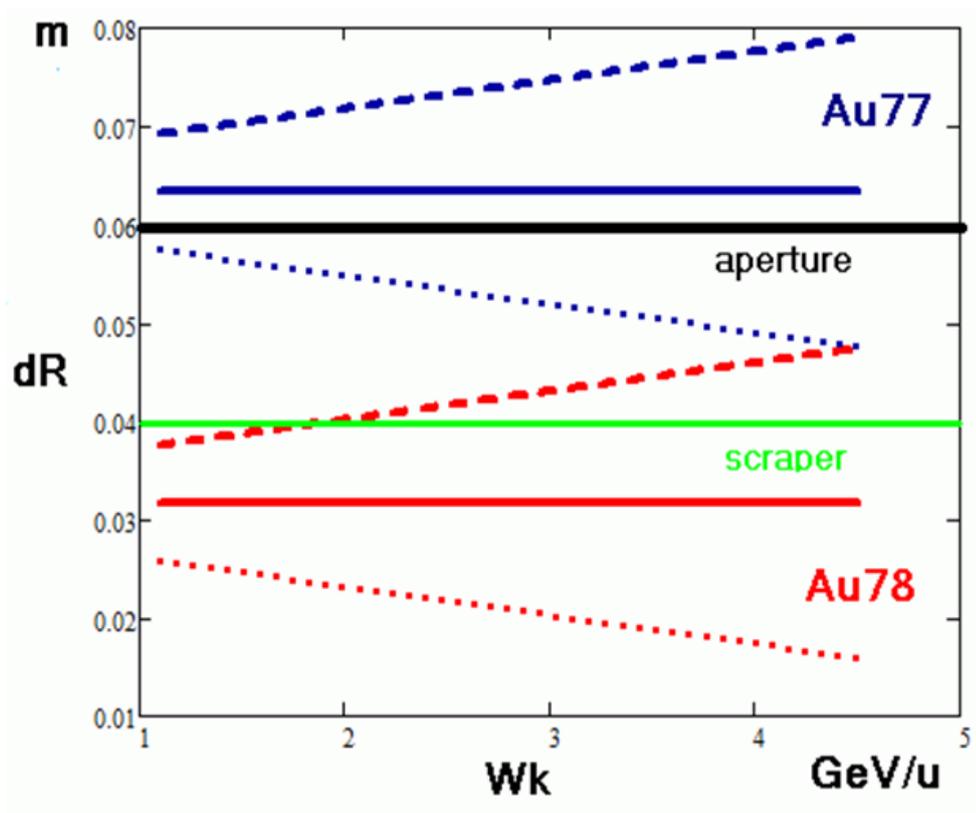


Рис. 7.6.15. Движение частиц Au^{78+} и Au^{77+} , сдвиг их орбит и зона движения в камере Коллайдера в максимуме дисперсии

Рис. 7.6.15 показывает, что циркулирующий пучок в пределах камеры Коллайдера может содержать, не только ионы Au^{78+} , но и ионы Au^{77+} , число которых возрастает с увеличением энергии. Для избавления от ионов этой зарядности необходимы скреперы на радиусе, приблизительно, 4 см в максимумах дисперсии.

Сепаратрисы Au^{79+} и Au^{78+} имеют пересечение в областях энергий $1 \div 3,5$ ГэВ/н. Таким образом, ионы после рекомбинации могут оказаться как внутри сепаратрисы, так и вне её, то есть двигаться внутри определённой «зоны». В отличие от частиц,двигающихся вне сепаратрисы параллельно дисперсионной траектории, синхротронные частицы всегда пересекают орбиту. Это означает, что синхронная частица будет последней «погибшей», из находящихся внутри сепаратрисы, на скрепере. Сдвиг орбиты Au^{78+} относительно центра вакуумной камеры возрастает с энергией (Рис. 7.6.16).

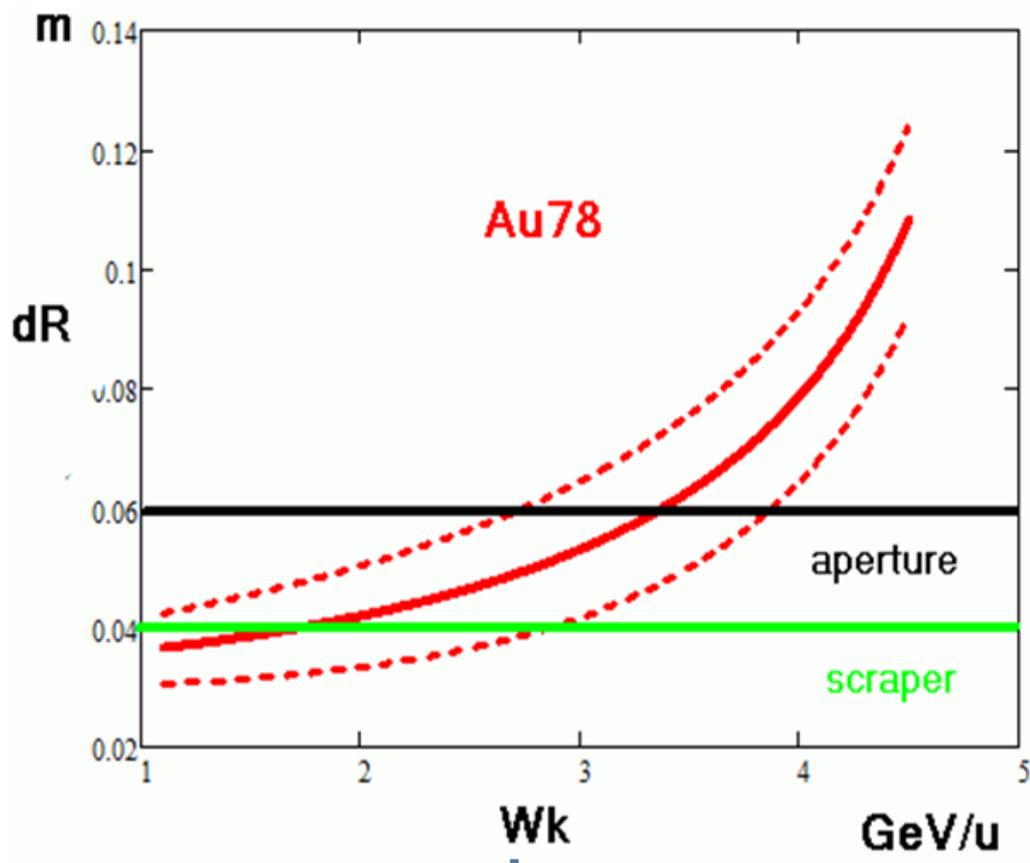


Рис. 7.6.16. Ионы Au^{78+} вовлечённые в синхротронное движение. Радиальный сдвиг орбиты и зона движения в максимуме дисперсии относительно центральной орбиты Au^{79+}

Орбита Au^{78+} пересекает радиус, на котором расположен скрепер, при энергии 1,7 ГэВ/н. Таким образом, синхротронное движение этих ионов возможно только до этой энергии. Однако, частицы образовавшиеся внутри сепаратрисы все ещё могут продолжать движение в камере. Время этого движения — меньше половины синхротронного периода. Начиная с 2,8 ГэВ/н и выше синхротронное движение ионов 78 зарядности невозможно в принципе.

С помощью кода ESME была проведена симуляция этих процессов для разных энергий. Результат моделирования показан на Рис. 7.6.17. При 1 ГэВ/н синхротронное движение возможно только для частиц, образовавшихся внутри сепаратрисы. При 1,6 ГэВ/н видно, что только небольшое количество частиц остаётся внутри корзины.

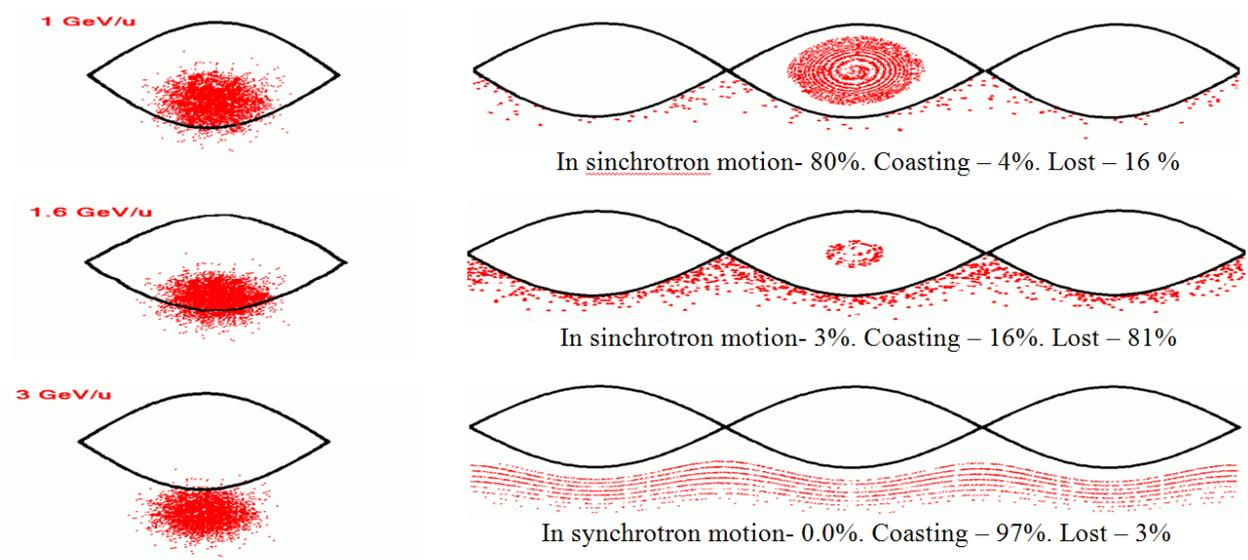


Рис. 7.6.17. Симуляция движения ионов Au^{78+} в фазовом пространстве для энергий 1, 1,6 и 3 ГэВ/н

По мере увеличения энергии в Коллайдере соотношение между количеством частиц вовлечённых в синхротронное движение, частиц, свободно дрейфующих в ионопроводе и частиц осевших на скреперах меняется. Скреперы вычищают все ионы, начиная с зарядности +77. Таким образом соотношение частиц зависит от сечения 2-х реакций: $Au^{79+} + e^- \rightarrow Au^{78+}$ и $Au^{78+} + e^- \rightarrow Au^{77+}$. Оценки показывают, что сечение второй реакции больше сечения первой реакции, приблизительно, в 10 раз (Рис. 7.6.18). При этом полное соотношение Au^{79+} и Au^{78+} будут иметь следующую временную зависимость:

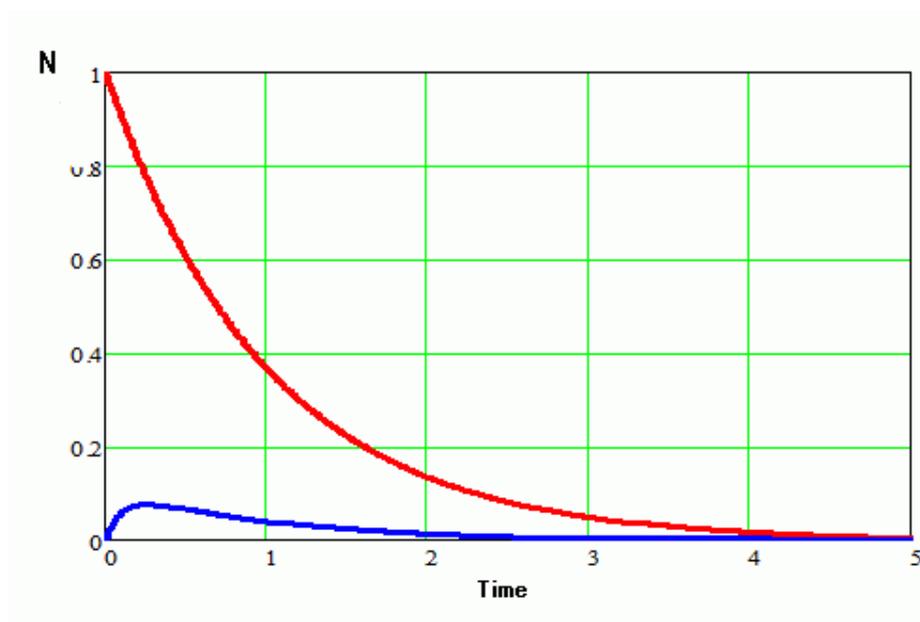


Рис. 7.6.18. Изменение числа ионов Au^{78+} (голубой) и Au^{79+} (красный) во времени (характерные времена)

Стационарное соотношение количества ионов $N(\text{Au}^{78+})/N(\text{Au}^{79+})$ обратно пропорционально соотношению их сечений.

7.6.7.1 Выводы по движению перезаряженных ионов

1. Ионы Au^{79+} , Au^{78+} , Au^{77+} могут циркулировать в вакуумной камере Коллайдера.
2. Скреперы, помещённые в вакуумную камеру на радиусе $R = 4$ см в максимумах дисперсионной функции, могут устранить все ионы Au^{77+} .
3. Ионы Au^{78+} будут жить в вакуумной камере до тех пор, пока не произойдёт следующая рекомбинация до состояния Au^{77+} .
4. Часть ионов Au^{78+} , участвующих в синхротронном движении оседет на скреперах. Число осевших ионов зависит от энергии.
5. Ионы Au^{78+} вовлечённые в синхротронное движение будут видимы детектором одновременно с ионами Au^{79+} . Соотношение их интенсивностей может быть вычислено путём умножения соотношения сечений реакций ($\text{Au}^{79+} + e^- \rightarrow \text{Au}^{78+}$ и $\text{Au}^{78+} + e^- \rightarrow \text{Au}^{77+}$) на количество частиц Au^{78+} вовлечённых в синхротронное движение.
6. Число ионов Au^{78+} участвующих в синхротронном движении пренебрежимо мало при энергиях свыше 1,6 ГэВ/н

7.7 СИСТЕМА СТОХАСТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Применение стохастического охлаждения также привлекательно и в ходе коллайдерного эксперимента с тяжёлыми ионами, так как оно не приводит к дополнительным потерям частиц и формированию плотного ядра пучка, образование которого может провоцировать развитие различных неустойчивостей пучка. При этом режим работы системы охлаждения отличается от всех использованных ранее на действующих установках.

Возможность работы стохастического охлаждения пучка с высоким фактором группировки (близким к требуемому в проекте NICA) была продемонстрирована на коллайдере RHIC. Однако, в отличие от RHIC, при работе коллайдера вблизи критической энергии эффективность охлаждения существенно зависит от энергии пучка. Поэтому, для проведения сканирования по энергии, необходимо удовлетворить дополнительным требованиям как к структуре Коллайдера NICA, так и к размещению элементов системы на его периметре.

Суть этих дополнительных требований можно проиллюстрировать на простых аналитических оценках. Система стохастического охлаждения представляет собой широкополосную систему

обратной связи. Сигнал от пучка, измеренный специальным устройством — пикапом, обрабатывается, усиливается и с соответствующей задержкой передаётся на кикер — устройство, воздействующее на пучок. При оптимальном коэффициенте усиления системы (и в пренебрежении собственным шумом усилителя), темп стохастического охлаждения для всех трех степеней свободы можно оценить по следующей широко известной формуле:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{N_{eq}} \frac{(1 - 1/M_{pk}^2)^2}{M_{kp}}. \quad (7.7.1)$$

Здесь $W = f_{\max} - f_{\min}$ — ширина полосы ССО. Для сгруппированного пучка эквивалентное число частиц N_{eq} вычисляется через фактор группировки (П.1.2.15):

$$N_{eq} = N \frac{C_{Ring}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}. \quad (7.7.2)$$

где N — число частиц в сгустке, C_{Ring} — периметр кольца, σ_s — среднеквадратичная длина сгустка. Для уменьшения времени охлаждения желательно иметь полосу пропускания системы W как можно шире, однако, кроме ограничений, связанных с техническими возможностями мощной электроники, ширина полосы ограничена параметрами ускорителя и разбросом по импульсу в охлаждаемом пучке. Время пролёта частицы от пикапа до кикера увеличивается (или уменьшается), если её импульс отличается от номинального значения. Если разница между временами пролёта частицы и прохождения сигнала через радиотехническую линию становится больше длительности импульса, приложенного к кикеру, охлаждение перестает работать. Нежелательный фактор перемешивания частиц при их пролёте от пикапа к кикеру:

$$M_{pk} = \frac{1}{2(f_{\max} + f_{\min})\eta_{pk}T_{pk} \frac{\Delta p}{p}}, \quad (7.7.3)$$

определяет предел на верхнюю частоту f_{\max} полосы системы, которая может быть оценена как:

$$f_{\max} \leq \frac{1}{2\eta_{pk}T_{pk} \frac{\Delta p}{p}}. \quad (7.7.4)$$

«Полезный» фактор перемешивания частиц при пролёте от кикера к пикапу может быть рассчитан как:

$$M_{kp} = \frac{1}{2(f_{\max} - f_{\min})\eta_{kp}T_{kp} \frac{\Delta p}{p}}, \quad (7.7.5)$$

и в идеальном случае он должен быть максимальным — близким к единице. Здесь, в формуле η_{pk} η_{kp} , T_{pk} , T_{kp} — это частичные слип-факторы и времена пролёта от пикапа к кикеру, а также от кикера к пикапу соответственно. Обычно, при оценке характерного темпа охлаждения, вместо разброса по импульсу может быть подставлено его среднеквадратичное значение σ_p : $\Delta p/p = 2\sigma_p$.

В накопителе, имеющем форму близкую к окружности, частичные слип-факторы близки между собой и определяются энергией частиц и критической энергией накопителя:

$$\eta_{pk} = \eta_{kp} = \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_{tr}^2}. \quad (7.7.6)$$

Так, в коллайдерах высокой энергии, когда $\gamma \gg \gamma_{tr}$, для обеспечения эффективной работы стохастического охлаждения достаточно выбрать оптимальное значение критической энергии. При этом эффективность охлаждения практически не зависит от энергии частиц. В коллайдере низкой энергии, уменьшение энергии приводит к быстрому росту слип-фактора и, как следствие, к снижению допустимой верхней частоты системы и эффективности охлаждения.

В качестве одного из решений этой проблемы, в ходе разработки проекта NICA была исследована возможность работы Коллайдера с перестройкой критической энергии. Однако, такой режим не позволяет обеспечить во всем требуемом диапазоне энергий большую величину акцептанса.

Другое решение основано на учёте конкретной геометрии орбиты Коллайдера и специфики динамики продольного движения частиц. В проекте NICA предусмотрено столкновение пучков в двух точках встречи, при этом естественная форма кольца с минимальным периметром является рейс-треком: две поворотные секции соединены друг с другом двумя прямолинейными секциями, в которых находятся точки встречи. В диапазоне энергий, начиная примерно с 3 ГэВ/н и выше, характер продольного движения частиц различен в поворотных и прямолинейных секциях. Так, у частицы с импульсом больше равновесного, время пролёта поворотной секции оказывается меньше, чем у равновесной частицы, а в прямолинейной секции она «догоняет» равновесную частицу. Выбрав положение пикапа на входе поворотной секции, можно найти такое положение для кикера в последующей прямолинейной секции, что время пролёта от пикапа до кикера при некоторой выбранной энергии не будет зависеть от импульса частицы. Таким образом можно обеспечить эффективность работы стохастического охлаждения в достаточно широком диапазоне энергий.

Для выбранной оптической структуры Коллайдера оптимизация расстановки оборудования системы стохастического охлаждения позволяет обеспечить эффективное стохастическое охлаждение пучка в диапазоне энергий от 3 до 4,5 ГэВ/н. Например, расположение пикапа и кикера для охлаждения продольной степени свободы выбрано таким образом, чтобы при максимальной

энергии (4,5 ГэВ/н) частичный слип-фактор между пикапом и кикером имел небольшое отрицательное значение $\eta_{pk} = -2 \cdot 10^{-3}$, а при минимальной энергии (3 ГэВ/н) небольшое положительное значение $\eta_{pk} = 5 \cdot 10^{-3}$ (Рис. 7.7.1). В таком случае нам практически полностью удаётся подавить нежелательное перемешивание частиц во всем диапазоне энергий, и, напротив, усилить полезное перемешивание частиц при пролёте между кикером и пикапом. Возможность использования подобного режима работы стохастического охлаждения неоднократно обсуждалась и ранее (например, при проектировании накопителей для пучков короткоживущих радиоактивных ионов, когда требуется предельно высокий темп охлаждения). Однако, до технического проекта ни одно из предложений не было доведено в связи с трудностями по обеспечению требуемой величины аксептанса накопителя. Диапазон энергий ионов и геометрия кольца Коллайдера NICA оказались наиболее подходящими для реализации этой красивой идеи.

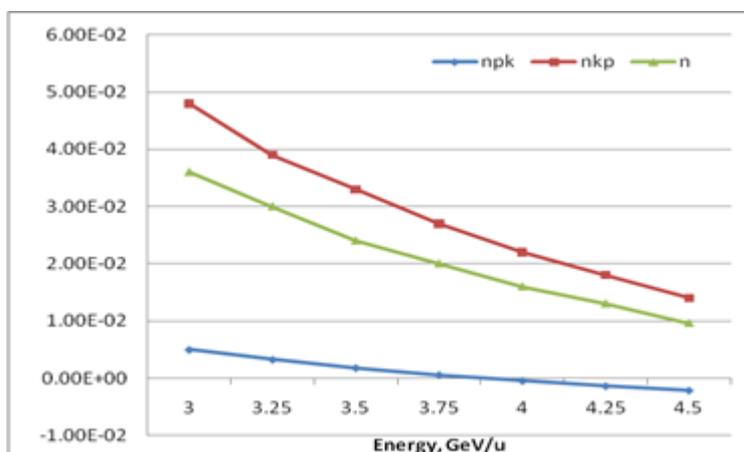


Рис. 7.7.1. Расчётные зависимости полного слип-фактора (n), частичного слип-фактора между пикапом и кикером (n_{pk}), а также частичного слип-фактора между кикером и пикапом (n_{kp}) от энергии

При выбранном взаимном расположении пикапа и кикера, условие (7.7.4) даёт оценку для приемлемого значения верхней полосы частот системы 20 ГГц (с учётом того, что разброс по импульсу равен динамической продольной апертуре кольца $\pm 0,01$). Это означает, фактически, что для рассматриваемой оптической структуры выбор полосы частот системы ограничен только лишь техническими возможностями. В нашем конкретном случае для достижения светимости на уровне $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ необходимо иметь $2,3 \cdot 10^9$ ионов в сгустке, что соответствует эффективному числу ионов $8 \cdot 10^{11}$. Легко оценить, что для того, чтобы обеспечить характерные времена охлаждения в 2 раза более короткие (чтобы иметь технический резерв), чем характерные времена нагрева за счёт ВПР, ширина полосы частот системы стохастического охлаждения может быть выбрана $2 \div 4$ ГГц. Это соответствует диапазону, хорошо освоенному в мировой практике и не представляющему серьёзных радиотехнических трудностей.

С учётом геометрических ограничений и дополнительных требований по набегу фазы колебаний, накладываемых на системы поперечного охлаждения, в рамках технического проекта Коллайдера

NICA было определено оптимальное размещение элементов систем стохастического охлаждения для всех трех степеней свободы (Рис. 7.7.2).

В диапазоне энергий ниже 3 ГэВ/н для обеспечения максимального уровня светимости решено использовать систему электронного охлаждения.

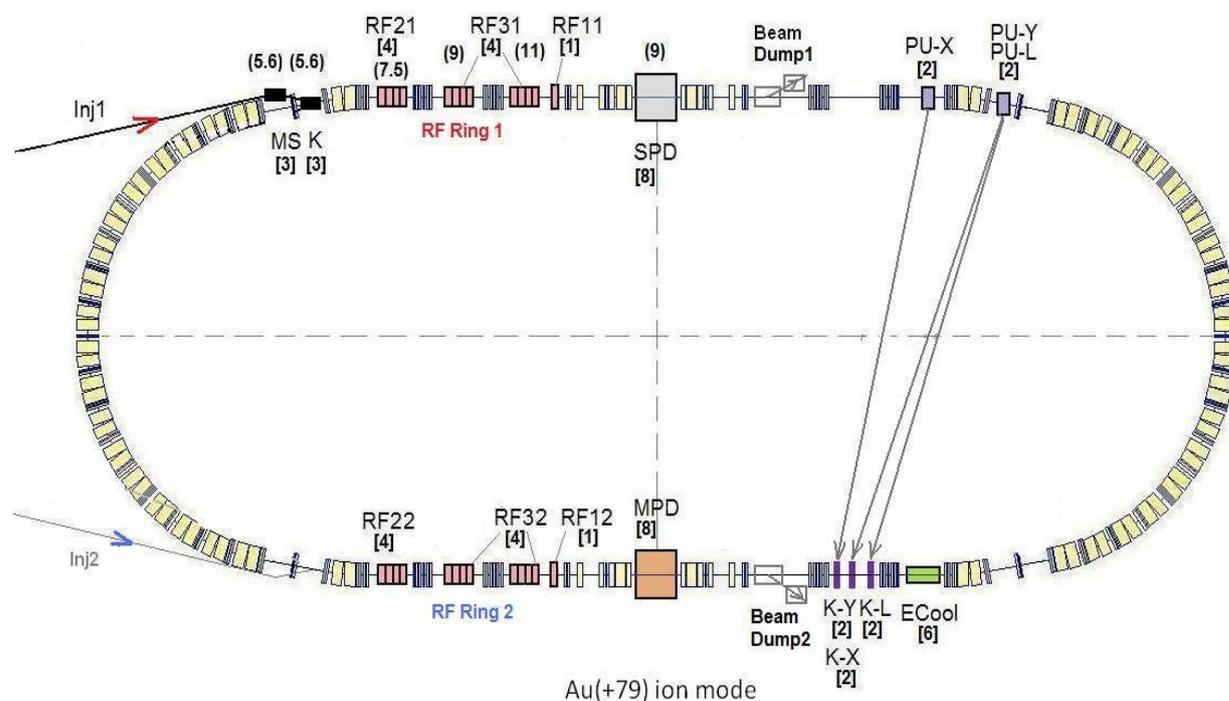


Рис. 7.7.2. Схема размещения оборудования на периметре Коллайдера NICA. RF — элементы высокочастотной системы. MS и K — магнитный септум и кикер системы инжекции пучка. MPD — многоцелевой детектор, SPD — детектор для исследования физики спина. Beam Dump — система эвакуации пучка. PU-X, Y, L — горизонтальный вертикальный и продольный пикапы системы стохастического охлаждения, K-X, Y, L — соответствующие кикеры. ECool — секция электронного охлаждения

Основные требования и характерные параметры для системы стохастического охлаждения Коллайдера NICA приведены в следующей таблице (здесь η -слип-фактор) в Таблице 7.7.1.

Таблица 7.7.1. Основные требования к системе стохастического охлаждения Коллайдера

Энергия ионов, ГэВ/н	Начальный $\Delta p/p$, 10^{-3}	N , 10^{10}	$\eta_{\text{полный}}$	η между пикапом и кикером	Темп нагрева за счёт IBS, с
1	0,62	0,6	0,215	0,199	160
2	1,00	1,0	0,082	0,067	300
3	1,25	5,3	0,037	0,021	460
4	1,65	4,8	0,016	0,00061	1250
4,5	1,65	4,8	0,0099	-0,0057	1800

Результаты компьютерных оценок и симуляций (сделанных авторами проекта, а также L. Thorndahl (CERN) и T. Katayama (GSI) показывают, что стохастическое охлаждение возможно к эффективному использованию только в диапазоне энергий выше 3 ГэВ/н. При энергиях ниже 3 ГэВ/н охлаждение не может быть получено из-за того, что локальный (между пикапом и кикером) и полный слип-

факторы становятся большими по величине (что сильно замедляет и даже останавливает процесс охлаждения), в то время как требуются времена охлаждения все меньшие и меньшие в силу того, что характерные темпы нагрева пучка становятся короткими.

Т.н. метод Палмера предполагается использовать для охлаждения продольной степени свободы, поскольку он даёт высокую эффективность и применим в наиболее широком диапазоне энергий ($3 \div 4,5$ ГэВ/н) в сравнении с другими традиционными методами охлаждения (метод фильтров и времяпролетный метод). Для применения этого метода требуется большая величина дисперсии в точке расположения пикапа, в то время, как максимальная дисперсия в кольце составляет всего 2,5 м, что довольно мало для эффективной работы системы охлаждения. Это не так важно для расчётов, но в принципе охлаждение при энергиях выше 4 ГэВ/н можно получить и с использованием метода фильтров, поэтому в качестве альтернативы такой метод тоже рассматривается. Более того, применение ещё одного (недавно предложенного D. Moehl (CERN) метода, который использует разностный сигнал от двух пикапов, также рассматривается и изучается. Результат использования такого метода не зависит от дисперсии, и диапазон применимых к охлаждению диапазонов импульсного разброса у него практически такой же, как и метода фильтров. Предварительные расчёты показывают преимущество этого метода, но поскольку он ещё ни разу экспериментально не применён, то от разработчиков требуются дополнительные исследования этого метода.

Основные параметры системы стохастического охлаждения приведены в Таблице 7.7.2.

Таблица 7.7.2. Основные параметры системы стохастического охлаждения Коллайдера

Энергия, ГэВ/н	3	4 ÷ 4.5
Темп роста за счёт ВПР, с	700	1500 ÷ 2000
«Продольное» охлаждение	Palmer	Palmer/filter
Время охлаждения, с	< 500	
Коэффициент усиления системы, дБ	< 90	
Мощность сигнала на кикере, Вт	< 50	
Мощность воздействия на кикера на пучок, Вт	< 500	

7.7.1 Расположение элементов системы

Для того чтобы обеспечить т.н. 3-х мерное охлаждение (т.е. компенсировать рост эмиттанса за счёт ВПР по всем трём степеням свободы) для каждого из двух колец Коллайдера предусмотрены 3 системы (канала) охлаждения: продольный, горизонтальный и вертикальный. Схема расположения каналов и основных элементов показаны на Рис. 7.7.3.

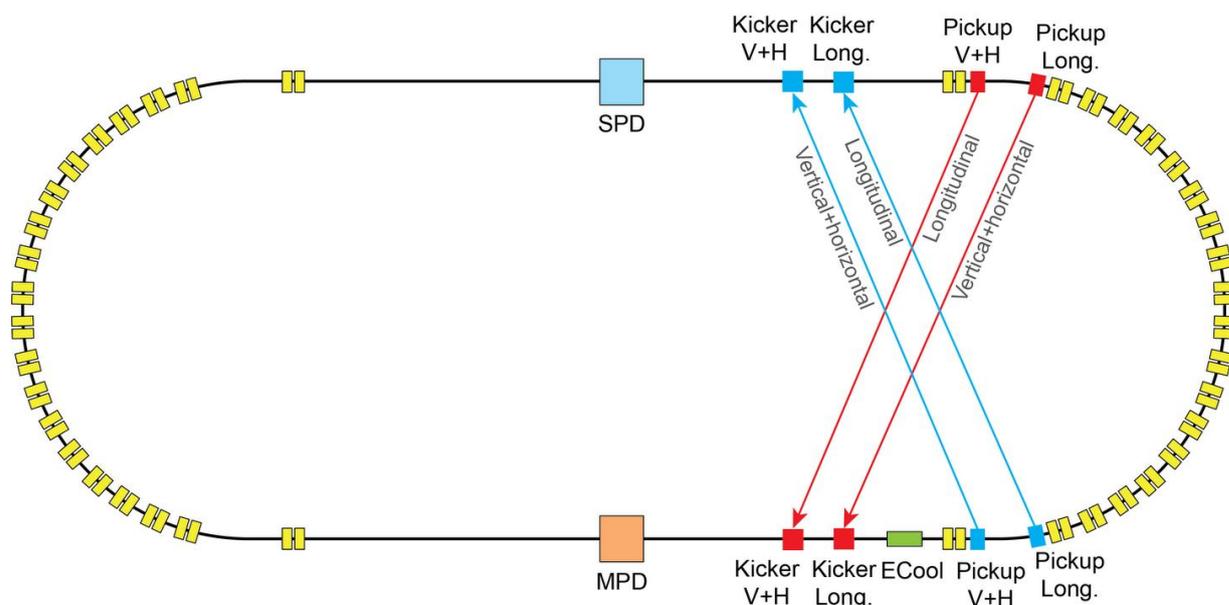


Рис. 7.7.3. Система стохастического охлаждения (нижнее кольцо — красный канал, верхнее — синий)

Расположение пикап-станций и кикеров — зеркально симметрично для обоих колец. Система охлаждения продольной и поперечной степеней свободы разделены полностью. Системы охлаждения поперечных степеней свободы — горизонтальной и вертикальной — могут использовать общие пикап-станции и кикеры. Такое расположение соответствует схеме применения метода Палмера для продольной степени свободы, который требует относительно большое значение дисперсии в пикап-станции, в то время как охлаждения горизонтальной степени свободы необходима нулевая дисперсия, чтобы не допустить перекачки амплитуды между степенями свободы. Структурные функции показаны на Рис. 7.7.4.

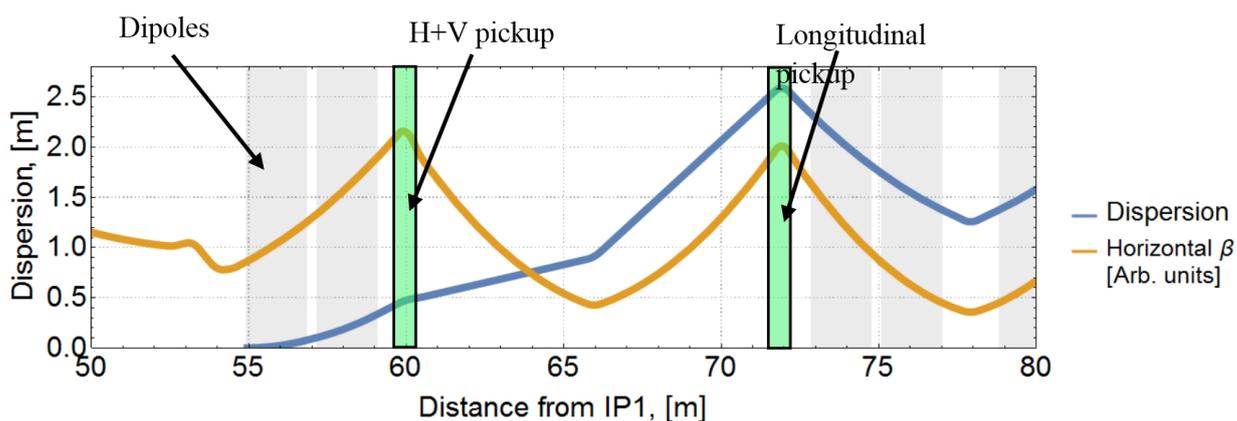


Рис. 7.7.4. Структурные функции в пикап-станции

Пикап-станция канала продольного охлаждения расположен в точке с максимальной дисперсией, соответственно пикап-станции горизонтального и вертикального каналов — в точке с нулевой дисперсией и большой величиной бета-функции. Пикап-станция канала поперечного охлаждения установлен в точке с ненулевой дисперсией для того, чтобы избежать интерференции с системой

электронного охлаждения. Такое расположение позволяет иметь требуемый набег фаз для обеих поперечных степеней свободы: $\Delta\Psi/\pi = 3,5 \pm 0,1$.

7.7.2 Основное оборудование системы

В число основных элементов системы стохастического охлаждения входят: пикап-станции, кикеры, блоки системной задержки, каскад усилителей и предусилителей, а также система режекторного (гребенчатого) фильтра.

Модульные кольцевые станции типовой конструкции будут использоваться в качестве пикап-станций и кикеров. Эти устройства разработаны в ИЯФ (г. Юлих, Германия), прошли успешные испытания на накопительном кольце COSY в Германии и на Нуклотроне (ОИЯИ, г. Дубна) и показали свою эффективность. Планируется изготовить серию подобных устройств и использовать их в качестве основных элементов пикап-станций и кикеров (с соответствующим набором кольцевых мониторов положения пучка) для каналов охлаждения горизонтальной и вертикальной степеней свободы (Рис. 7.7.5).

Изначально эти устройства были разработаны для системы стохастического охлаждения накопителя HESR (проект FAIR, Германия) и в ближайшие годы запланирована оптимизация конструкции этих устройств для использования в Коллайдере NICA: уменьшить апертуру с 90 до 70 мм, оптимизировать количество лепестков электродов для колец.

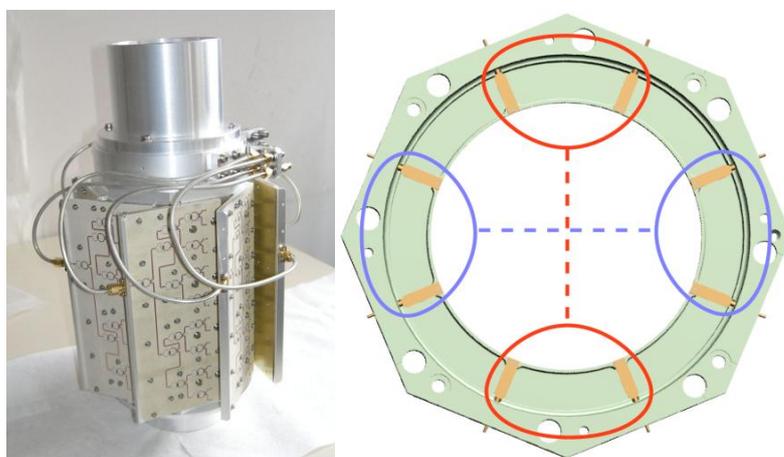


Рис. 7.7.5. Левый — пикап-станция (набор из 16 колец), правый — комбинация электродов для измерения горизонтального (синий) и вертикального сигнала амплитуды пучка

В системе будут использованы твердотельные усилители, поскольку именно они обеспечивают в настоящее время наилучшие амплитудные и фазовые характеристики. Практически достижимая выходная мощность одного такого устройства составляет около $60 \div 70$ Вт, поэтому для того, чтобы обеспечить полную требуемую выходную мощность системы на уровне 500 Вт, предложено включить в параллельную схему $8 \div 10$ кикеров и запитывать их каждый отдельно. Альтернативная стратегия состоит в том, что возможно использовать для каждого лепестка-электрода (или группы

лепестков) кольца пикап-станции свой маломощный усилитель. В этом случае стоимость системы можно значительно снизить, но возникает проблема несфазированности таких усилителей. Эта концепция требует аккуратной экспериментальной проверки на системе стохастического охлаждения Нуклотрона.

Оптическая системная задержка (блок) и оптический гребенчатый фильтр (комплекс оборудования) разработаны и успешно испытаны на Нуклотроне, — такое техническое решение выбрано для использования в Коллайдере.

7.7.3 Программное обеспечение

Комплекс АСУ и программного обеспечения системы стохастического охлаждения для Коллайдера NICA активно развивается и испытывается в сеансах. Разрабатываются 2 основных системы: контроль и автоматизация измерений, а также удалённое управление системными задержками. В настоящее время уже развит и внедрён специальный комплекс программ, обеспечивающий автоматизацию управления и контроля системой задержек. В ближайшем будущем этот комплекс будет развит для потребностей Коллайдера (все 6 каналов охлаждения, интеграция в общую систему диагностики и контроля, а также в АСУ Tango).

7.7.4 Система стохастического охлаждения для стартовой версии комплекса

Стартовая версия комплекса NICA предполагает работу в диапазоне энергий $3,0 \div 4,5$ ГэВ/н, $1/4$ от проектной интенсивности пучка (около $5 \cdot 10^8$ частиц в сгустке, вместо $2 \cdot 10^9$) и $1/3$ величины импульсного разброса от проектного значения. Конфигурация системы стохастического охлаждения существенно упрощена в этом случае — необходим только продольный канал охлаждения (на базе метода фильтров).

7.8 СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Система электронного охлаждения (СЭО) Коллайдера NICA предназначена для накопления ионов в диапазоне их кинетической энергии $1 \div 3,5$ ГэВ/н и стабилизации светимости Коллайдера на требуемом уровне в режиме сталкивающихся пучков во всём рабочем диапазоне энергии ($1 \div 4,5$ ГэВ/н). Численное моделирование эволюции параметров пучка при электронном охлаждении при технически реалистичных параметрах СЭО (Таблица 7.8.1) показывает выполнения этой задачи.

Таблица 7.8.1. Параметры системы электронного охлаждения Коллайдера NICA

Энергия электронов, МэВ	1.0 ÷ 2.5
Стабильность энергии, $\Delta E/E$	$1 \cdot 10^{-5}$
Эффективная длина участка охлаждения, м	6,0
Ток электронного пучка, I_e , А	0.1 ÷ 1
Радиус электронного пучка, см	0.5
Магнитное поле в секции охлаждения, Тл	0,2
Неоднородность магнитного поля	$2 \cdot 10^{-5}$
Значения бета-функций в секции охлаждения, м	
– горизонтальная	11 ÷ 13(центр) – 17
– вертикальная	13 ÷ 14(центр) – 16
Поперечная температура электронов, эВ	50,0
Продольная температура электронов, мэВ	5,0
Время жизни ионов вследствие рекомбинации, час	1,0

Для уменьшения коэффициента рекомбинации температура поперечной степени свободы электронного пучка должна быть увеличена, а «замагниченность» электронов позволяет сохранить достаточно большое значение силы трения. Приведенные в табл. 6.4 параметры системы охлаждения обеспечивают время жизни пучка за счёт рекомбинации с электронами не менее одного часа. Максимальная энергия электронов (2,5 МэВ) выбрана таким образом, чтобы обеспечить охлаждение тяжелых ионов при максимальной магнитной жёсткости Коллайдера.

Ближайшим аналогом системы электронного охлаждения Коллайдера NICA является СЭО на энергию электронов 2 МэВ, разрабатываемая ИЯФ им. Г. И. Будкера (г. Новосибирск) для синхротрона COSY и накопителя HESR (Исследовательский центр Юлих и проект FAIR, Германия). При разработке может быть использован также и опыт Национальной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL, США), в которой была успешно разработана и эксплуатировалась СЭО на энергию электронов 4,3 МэВ. Разработка СЭО Коллайдера NICA ведётся в сотрудничестве с ИЯФ и ВЭИ им. В.И. Ленина (г. Москва).

Рассматриваются два существенно различающиеся варианта схемы СЭО (Рис. 7.8.1). В варианте «а», проектируемом в ОИЯИ, создаются две независимые электронно-оптические системы, позволяющие охлаждать каждый из двух ионных пучков Коллайдера «своим» независимым электронным пучком. Системы имеют общий источник высокого напряжения, но независимые источники питания электронных пушек и коллекторов. Все эти источники размещаются в среднем баке (Рис. 7.8.1 а и Рис. 7.8.2) и его «голове», находящейся под высоким напряжением. Пушка и ускорительная трубка первого электронного пучка (левого на Рис. 7.8.2) расположены в левом баке. Из него электронный пучок поступает на участок охлаждения нижнего кольца Коллайдера. Выйдя из него, пучок входит в правый бак, где расположена ускорительная трубка первого пучка с тормозящим полем, заканчивающаяся коллектором электронов. Аналогично и зеркально симметрично устроена электронно-оптическая система второго пучка, охлаждающего ионы верхнего кольца. Электроны обоих пучков, замедленные в тормозящих электрических полях,

поступают в свои коллекторы. В такой схеме электроны одного из пучков движутся от катода до своего коллектора в направлении магнитного поля, тогда как электроны другого пучка против этого направления. Между катодом и коллектором каждого из пучков поддерживается постоянная (ускоряющая) разность потенциалов $U_{coll} = 2 \div 3$ кВ. В результате затраты мощности на рекуперацию пучка составляют

$$P_{coll} = I_e \cdot U_{coll} \leq 1.5 \text{ кВт.}$$

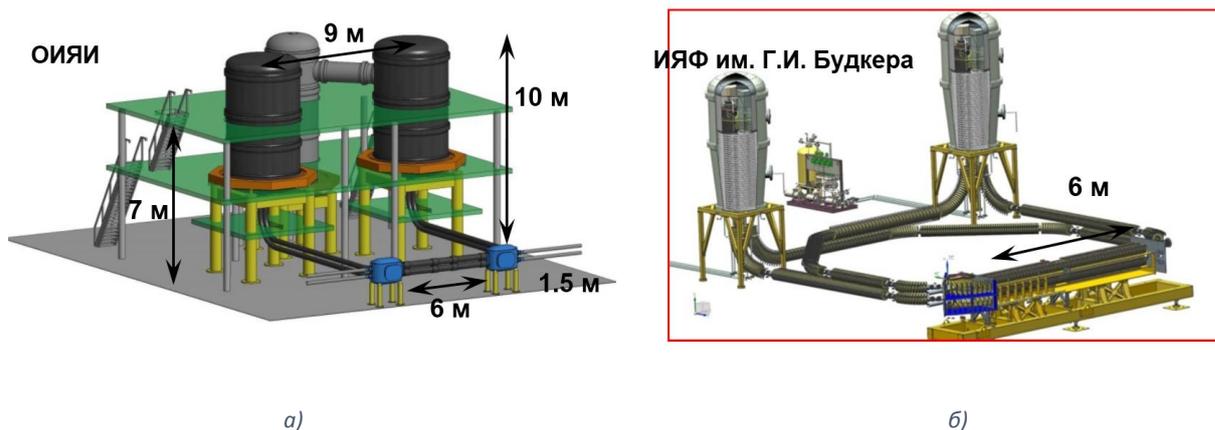


Рис. 7.8.1. Два варианта схемы СЭО: а) вариант ОИЯИ, б) вариант ИЯФ им. Г.И. Будкера

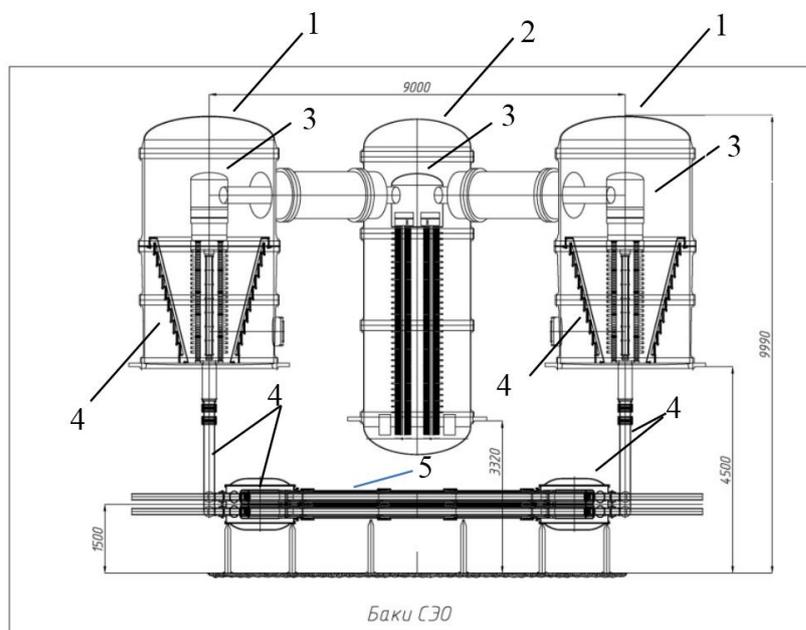


Рис. 7.8.2. Схема СЭО NICA (вариант «а»): 1 — баки с ускорительными трубками, 2 — генераторный бак, 3 — элементы СЭО под потенциалом до 2,5 МВ, 4 — соленоиды электронно-оптической системы транспортировки пучка, 5 — секция охлаждения ионных пучков

Потенциалы коллекторов (относительно катода пушки) поддерживаются источниками, расположенными в высоковольтном терминале генераторного бака (Рис. 7.8.3 а). Там же расположены источники, управляющие током электронных пушек и питающие подогрев их катодов

и источники, управляющие потенциалами репеллерных (супрессорных) электродов коллектора (Таблица 7.8.2).

Таблица 7.8.2. Параметры источников напряжения СЭО NICA

Источник	Количество	U, кВ	I, мА	W, Вт	Стабильность
Потенциал катода пушки	1	500 ÷ 2500	1	2500	$1 \cdot 10^{-5}$
Управляющий электрод пушки	2	±2	5	10	$1 \cdot 10^{-4}$
Накал катода пушки	2	0,02	5000	100	$1 \cdot 10^{-2}$
Потенциал коллектора	2	+3	1000	3000	$1 \cdot 10^{-3}$
Потенциал репеллера	2	±2	0,5	1,0	$1 \cdot 10^{-3}$

Мощность к источникам терминала подаётся от мотор-генератора, который вращается под действием изоляционного вала, приводимого в движение электромотором, расположенным на нулевом потенциале. Подобные устройства отработаны в электростатических ускорителях и обладают высокой надёжностью.

Эффективность захвата пучка в коллекторе достаточно высока: ток потерь пучка в современных коллекторах не превышает

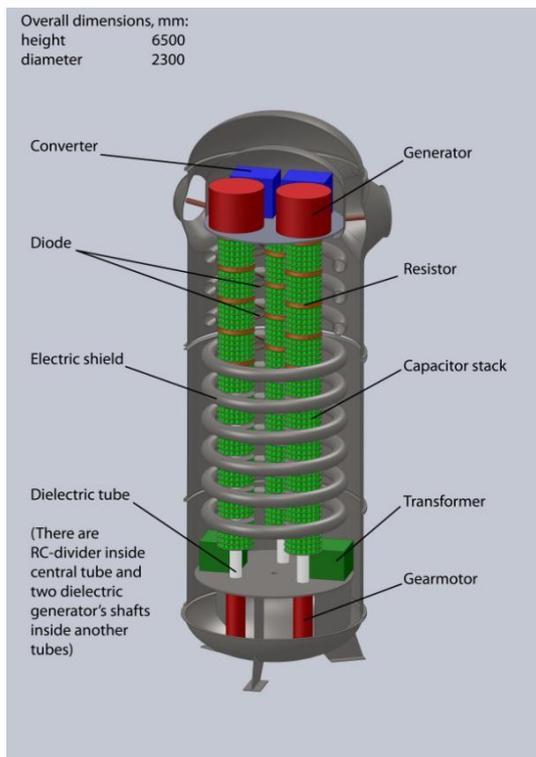
$$\Delta I \lesssim 10^{-4} \cdot I_e \leq 50 \text{ мкА.}$$

Этот ток входит в полную нагрузку генератора высокого напряжения

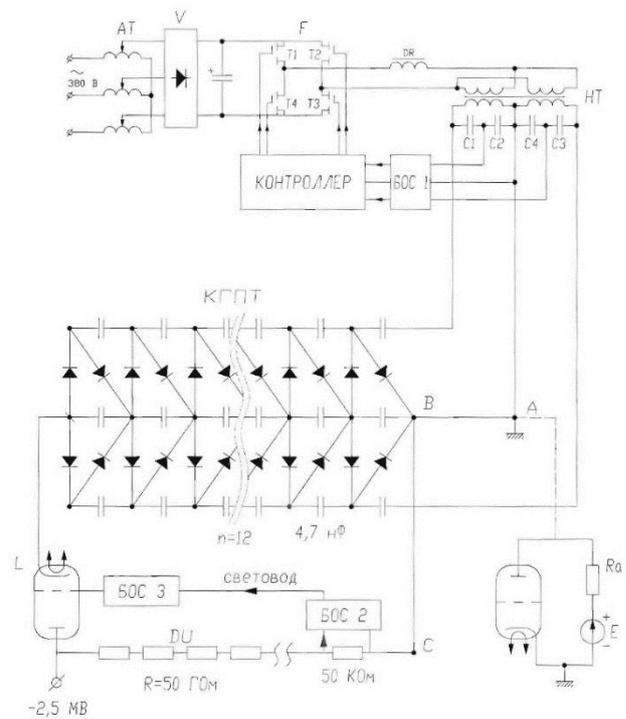
$$\Delta P = 2 \times \Delta I \cdot E/e \leq 250 \text{ Вт.}$$

Кроме того, мощность потребляют делители напряжения, необходимые для распределения потенциала вдоль ускорительных трубок и измерения напряжения.

В варианте «а» СЭО NICA имеет генератор высокого напряжения, рассчитанный на нагрузку 500 мкА. Генератор выполнен по схеме умножения напряжения (Рис. 7.8.3 б).



a)



б)

Рис. 7.8.3. Схемы генераторного бака и генератора высокого напряжения (вариант «а»)

В варианте «б», предложенном ИЯФ им. Г.И. Будкера, ускоряющая и замедляющая электронно-оптические системы (ЭОС) каждого из двух электронных пучков находятся в «своём» (одном и том же) баке. Поэтому каждая из двух ЭОС внутри бака имеет свой соленоид. Это позволяет сохранить направление поля относительно вектора скорости электронов на всей траектории от катода до коллектора (поля этих соленоидов направлены противоположно друг другу, как и скорости электронов в ускоряющей и замедляющей ускорительных трубках). Такое решение использовано в СЭО COSY. Минимизация габаритов в СЭО достигается благодаря использованию секционированных соленоидов, секции которых «подвешены» под потенциал, распределённый вдоль трубки.

Недостатком варианта «б» является большая, по сравнению с «а», длина транспортировочных соленоидов (около 20 м в рассматриваемом случае, Рис. 7.8.1 б).

Для варианта «а» возможна относительная сложность настройки режима рекуперации энергии электронов в двух пучках, ЭОС которых имеют общий источник высокого напряжения (0,5 ÷ 2,5 МВ).

Основной особенностью конструкции СЭО Коллайдера NICA является применение сверхпроводящих соленоидов, что позволяет значительно снизить энергопотребление СЭО, неизбежное при большой длине соленоидов магнитной системы транспортировки пучка.

Привлекательным представляется использование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). В настоящее время промышленно выпускаются ВТСП ленты шириной до 12 мм. Полная длина ВТСП ленты для соленоидов СЭО «а» составляет (Таблица 7.8.3) около 20 км. Её стоимость в ценах 2015 г. (\$ 60/м) — 1,2 млн. долларов США (цены ВТСП лент имеют тенденцию к снижению по мере развития их производства).

Таблица 7.8.3. Параметры соленоидов СЭО NICA (вариант «а», ВТСП лента шириной 12 мм)

Соленоид	Диаметр, мм	Длина, мм	Длина двухслойной обмотки, м
Конический секционированный соленоид участка ускорения/замедления электронов (2 шт.)			
Секция 1	1225	245	162
Секция 2	1347	245	178
Секция 3	1470	245	195
Секция 4	1590	245	210,4
Секция 5	1714	245	226,2
Секция 6	1836	245	243
Секция 7	1960	245	260
Секция 8	2080	245	275
Секция 9	2200	245	291
Секция 10	2325	245	307
Длина ленты проводника для двух секционированных соленоидов — 4692 м			
Соленоиды транспортировки электронов			
Прямой соленоид 1	156	1340	109,8
Тороидальный соленоид, $R = 1820$ мм	156	2860	234,2
Прямой соленоид 2	156	5290	433
Тороидальный соленоид, $R = 1500$ мм	156	2360	193,2
Полная длина ленты проводника для четырёх электропроводов — 3881 м			
Соленоид участка охлаждения	204	6000	641
Полная длина ВТСП ленты для одной СЭО подсчитать 92?? м			

В конструкции СЭО Коллайдера NICA будут использованы элементы СЭО «Pelletron», передаваемые из Лаборатории им. Ферми (США) — ускорительные трубки, опорные металлокерамические колонны, закорачивающие стержни и пр. (Рис. 7.8.4). Стержни используются при тренировке ускорительных трубок на высокое напряжение. Они вводятся через специальные отверстия с уплотнениями на рабочее давление, расположенные в днище бака. Эта технология развита и используется в Национальной электростатической корпорации (Мэдисон, США) и стала доступной в проекте NICA благодаря сотрудничеству с Лабораторией им. Ферми.

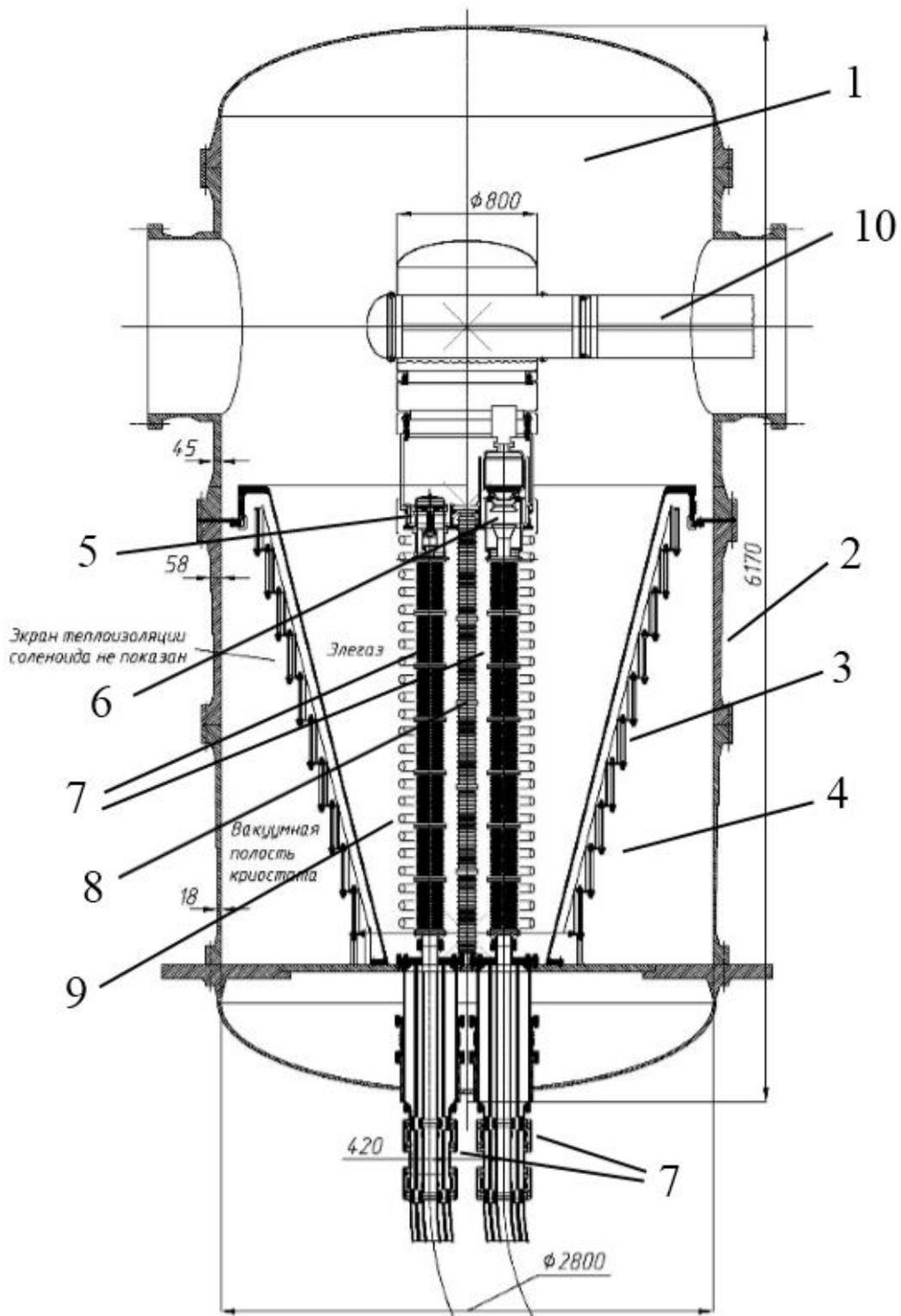


Рис. 7.8.4. Бак с ускорительными трубками: 1 — объем, заполненный элегазом под давлением 6 атм, 2 — стенка бака из магнитной стали, 3 — секционированный ВТСФ соленоид, 4 — термоизолирующий вакуумный объем ($P \approx 3$ мкТорр), 5 — электронная пушка, 6 — коллектор электронов, 7 — ускорительные трубки, 8 — опорная колонна (металлокерамика), 9 — охранные кольца, 10 — труба с коммуникационными фидерами передачи напряжений/мощности от высоковольтного терминала генераторного бака

Формирование продольного магнитного поля с необходимой степенью однородности осуществляется с помощью конических секционированных соленоидов, параметры которых определены на основе численного моделирования (Рис. 7.8.5). Форма и размеры высоковольтных элементов СЭО определены также на основе численного моделирования. Эта работа выполнена во Всероссийском электротехническом институте им. В.И. Ленина (г. Москва) по заказу ОИЯИ.

Динамика электронов в ЭОС СЭО Коллайдера NICA исследована методом численного моделирования. На основании полученных результатов определена геометрия элементов электронной пушки и коллектора электронов и сформулированы требования к параметрам электрического и магнитного полей на траектории электронов.

7.9 СИСТЕМА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

7.9.1 Введение

Система подавления (СП) когерентных поперечных колебаний пучка в Коллайдере NICA предназначена:

- для демпфирования когерентных поперечных колебаний, возникающих из-за ошибок инжекции,
- для подавления когерентных поперечных неустойчивостей,
- для возбуждения когерентных поперечных колебаний при проведении измерений частот бетатронных колебаний, функций отклика пучка и при выполнении других измерений, связанных с исследованиями поперечной динамики пучка.

Выбранные периметр Коллайдера, способы накопления частиц в Коллайдере и их вывода, способы подготовки сгустков к столкновениям практически исключают возможность использования предлагаемой СП для очистки межсгусткового пространства от фоновых частиц в пустых сепаратрисах. Если очистка межсгусткового пространства от фоновых частиц (прежде всего при инжекции и быстрой эвакуации пучка) в Коллайдере необходима, то подобная система должна проектироваться как независимая система.

Настоящее предложение разработано с учётом опыта создания системы подавления когерентных поперечных колебаний пучка в LHC [7.6 – 7.8].

7.9.2 Основные спецификации СП

В СП используются активные способы воздействия на сгусток с помощью корректирующего deflectора в соответствии со смещением центра тяжести этого же сгустка от равновесной орбиты,

которые фиксируются датчиком положения в предшествующие моменты времени. Перечень основных параметров Коллайдера в связи с разработкой подпроекта СП приведён в Таблице 7.9.1. Данные по Коллайдеру NICA указаны для ионного пучка ^{79+}Au . В Таблице 7.9.1 также указаны основные параметры СП (расчётная величина постоянной времени затухания когерентных поперечных колебаний сгустков и требования к устройствам СП в частотной области) с учётом оснований для их выбора.

Допуск на динамические ошибки при инжекции рассчитан с учётом величины погрешности компенсации угла влёта ионного сгустка с помощью инжекционного кикера $\Delta\chi'_{inj} = \pm 0,25$ мрад, причём считалось, что $\beta_{inj} = 17$ м и $\sigma_{inj} = 3,5$ мм (принятой для оценок величине σ_{inj} соответствует среднеквадратичный размер $\sigma_{x,y} = 2,5$ мм).

Таблица 7.9.1. Перечень основных параметров Коллайдера и СП для ионного пучка $^{197}\text{Au}^{79+}$

Параметр			значение
Кинетическая энергия (инжекция/столкновения)	W	ГэВ	1/4,5
Период обращения	T_{rev}	мкс	1,915/1,703
Частота обращения	f_{rev}	кГц	522,1/587,1
Скорость иона v, отнесённая к скорости света c	v/c		0,876/0,985
Кратность ускорения	h_{rf}		72
ВЧ-частота ускоряющего поля	f_{rf}	МГц	37,59/42,27
Среднеквадратичный размер горизонтальный ($\beta_{av} = 8.48$ м) вертикальный ($\beta_{av} = 8.49$ м) для оценок при инжекции ($\beta_{inj} = 17$ м)	σ_x	мм	2,83/1,59
	σ_y	мм	2,44/1,38
	σ_{inj}	мм	3,5
Число бетатронных колебаний за оборот Q_x/Q_y			9,44/9,43
Ошибки инжекции ($\beta_{inj} = 17$ м) статические (смещение орбиты) динамические (инжекционный кикер)	e_{inj}		$\pm 2\sigma_{inj}$
			$\pm 0,8\sigma_{inj}$
			$\pm 1,2\sigma_{inj}$
Постоянная времени перехода когерентных колебаний в некогерентные	τ_{dec}/T_{rev}		800
Постоянная времени развития поперечной неустойчивости для предельной интенсивности	τ_{inst}/T_{rev}		400
Допустимый рост эмиттанса	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	%	10
Постоянная времени демпфирования колебаний	τ_d/T_{rev}		100
Постоянная времени затухания колебаний	τ/T_{rev}		114
Минимальный интервал между сгустками	T_{rev}/h_{rf}	нс	71
Минимальная частота для СП	f_{min}	кГц	50
Максимальная частота для СП	f_{max}	МГц	7
Частота среза (-3.01 дБ) для СП		МГц	2,8
Полоса частот без резонансов в цепи ОС СП		МГц	0,05 ÷ 45

Величины τ_{dec} , τ_{inst} , $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ и статической ошибки (точность привязки уровней магнитного поля и энергии частиц при инжекции из Нуклотрона в Коллайдер) выбраны из общих соображений.

Допустимый рост эмиттанса

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = (e_{inj}/\sigma_{inj})^2 F_\varepsilon^2/2 \approx 10\%$$

достигается при постоянной времени демпфирования $\tau_d = \tau_{dec}/4$ и величине форм-фактора $F_\epsilon^2 = 0,02$ (см. Рис. 7.9.1). Для того, чтобы иметь некоторый запас по темпу демпфирования, принято $\tau_d = 100 T_{rev}$.

При этом величина наблюдаемой постоянной времени затухания при инжекции есть $\tau = 114 T_{rev}$, где по определению $\tau^{-1} = \tau_{dec}^{-1} + \tau_d^{-1} - \tau_{inst}^{-1}$.

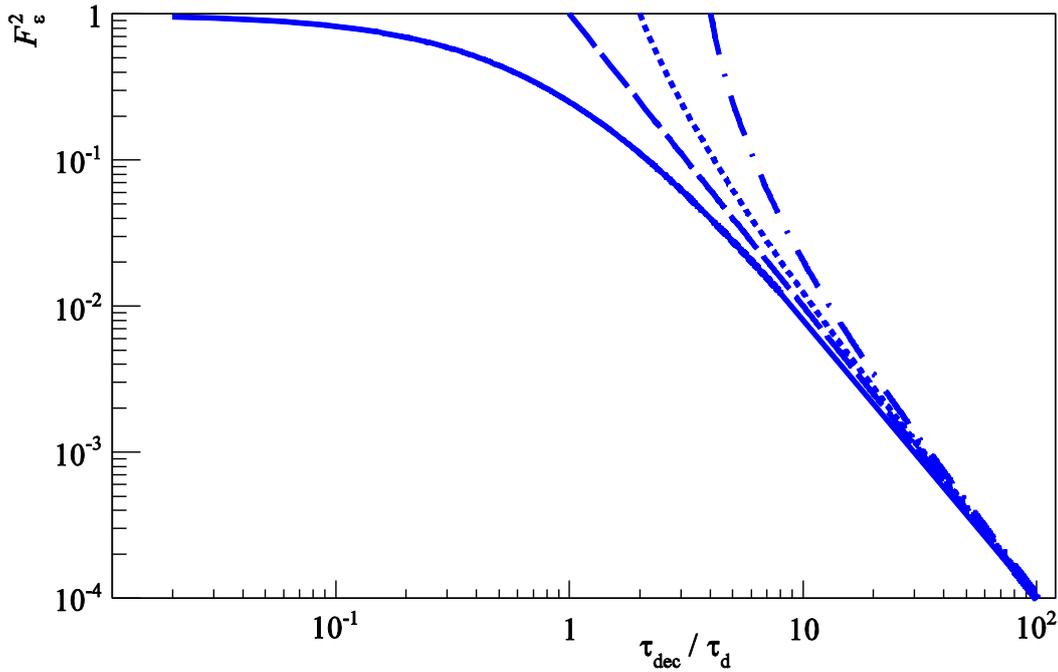


Рис. 7.9.1. Зависимости F_ϵ^2 от (τ_{dec}/τ_d) без неустойчивости (сплошная линия), $\tau_{inst} = \tau_{dec}$ (пунктирная линия), $\tau_{inst} = \tau_{dec}/2$ (точечная линия), $\tau_{inst} = \tau_{dec}/4$ (штрих-пунктирная линия)

Сила корректирующего воздействия на пучок F_k пропорциональна напряжённости электрического поля в электростатическом дефлекторе или индукции магнитного поля в магнитном дефлекторе СП. Изменение импульса иона после пролёта дефлектора пропорционально величине F_k и обратно пропорционально энергии частицы. Если величина максимальной силы корректирующего воздействия в дефлекторе неизменна во всем диапазоне энергий Коллайдера, то величина постоянной времени затухания на максимальной энергии будет примерно в три раза больше (около 300 оборотов). Однако при этом условие $\tau_d < \tau_{inst}$ выполняется (более того, обычно величина τ_{inst} с увеличением энергии растёт). Поэтому далее будет предполагаться, что величина максимальной силы корректирующего воздействия на пучок $F_k^{(max)} = const$. Таким образом, никаких дополнительных требований к СП при увеличении энергии частиц не возникает.

СП должна обеспечивать подавление когерентной поперечной неустойчивости на минимальной частоте, пропорциональной дробной части числа бетатронных колебаний. Поскольку СП

предполагается также использовать при измерении частот бетатронных колебаний методом сканирования, когда на дефлектор через оконечные усилители СП подаётся гармонический сигнал в полосе частот от $0,1 f_{rev}$ до $0,5 f_{rev}$, то минимальная частота f_{min} выбрана равной $0,1 f_{rev}$.

Для подавления когерентных дипольных колебаний соседних сгустков, расположенных в каждой третьей сепаратрисе, необходимо осуществлять демпфирование когерентных поперечных колебаний на частоте $f_{max} = 7$ МГц.

Поскольку данные о зависимости инкремента неустойчивости от частоты отсутствуют, то для оценок можно считать, что наиболее неблагоприятная ситуация может возникнуть на частоте, соответствующей половинному заполнению пучком орбиты, то есть для эквивалентных частот возмущений около 2,8 МГц. Данная частота выбрана в качестве расчётной частоты среза для радиотехнической части цепи обратной связи.

Полоса частот выбрана таким образом, чтобы исключить возможное негативное влияние радиотехнической части цепи обратной связи (ОС) системы подавления на пучок. Для этого необходимо обеспечить отсутствие резонансов в радиотехнической части цепи обратной связи СП от 50 кГц до 45 МГц.

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики радиотехнической части цепи обратной связи СП должны обеспечивать превышение декремента затухающих колебаний над инкрементом возможных когерентных поперечных неустойчивостей в рабочей полосе частот. Данное условие обеспечивается введением в радиотехническую цепь обратной связи СП устройств коррекции фазо-частотной характеристики. Требования к этим корректирующим устройствам можно сформулировать при знании зависимости τ_{inst} от частоты $\omega/2\pi$ с учётом размещённого в Коллайдере оборудования.

7.9.3 Блок-схема СП

Обычно для СП в синхротронах используется классическая схема (см. Рис. 7.9.2, слева). Сигнал, пропорциональный величине когерентного поперечного смещения центра тяжести сгустка, детектируется датчиком положения BPM и усиливается (K_{in}) до уровня, необходимого для его оцифровки в DSP. Модуль цифровой обработки сигнала DSP обеспечивает выполнение оптимальных фазовых соотношений между сигналом и демпфируемым сгустком, а также необходимую задержку сигнала τ_{delay} . После преобразования цифрового сигнала в аналоговый, последний усиливается (K_{out}) и поступает на дефлектор DK. В результате величина коррекции угла наклона траектории в DK пропорциональна смещению центра тяжести сгустка в BPM.

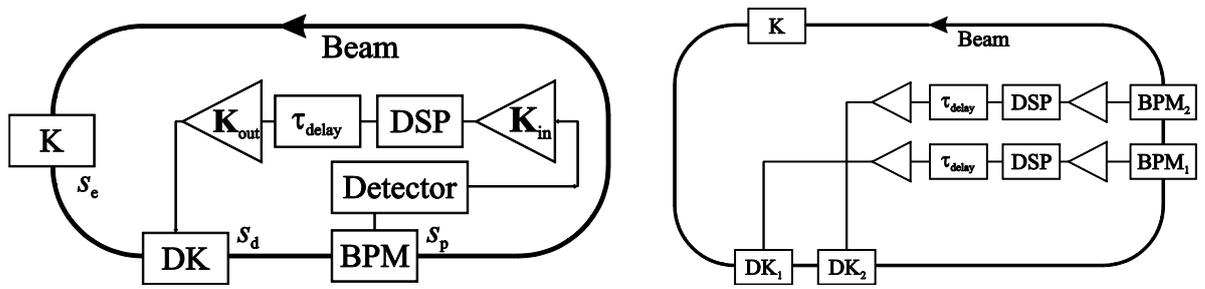


Рис. 7.9.2. Схема классической (слева) и быстрой (справа) СП

Если τ_{pk} — время пролёта сгустка от BPM до DK, а T_{rev} — период обращения частиц в синхротроне, то $\tau_{delay} = \tau_{pk} + q T_{rev}$, где q — целое число. Обычно корректирующее воздействие осуществляется в пределах оборота, так что далее будет считаться $q = 0$.

Настройку СП и контроль её параметров в различные моменты времени цикла работы Коллайдера удобно осуществлять, возбуждая когерентные поперечные колебания с помощью импульсного толкателя К (см. Рис. 7.9.2). Импульс возбуждения должен быть больше длины сгустка и короче периода обращения (то есть около 1 мкс). Поскольку импульсный толкатель необходим для измерения целой части числа бетатронных колебаний ионного сгустка, то этот же толкатель можно использовать для настройки СП, если предусмотреть данную возможность в его системе питания.

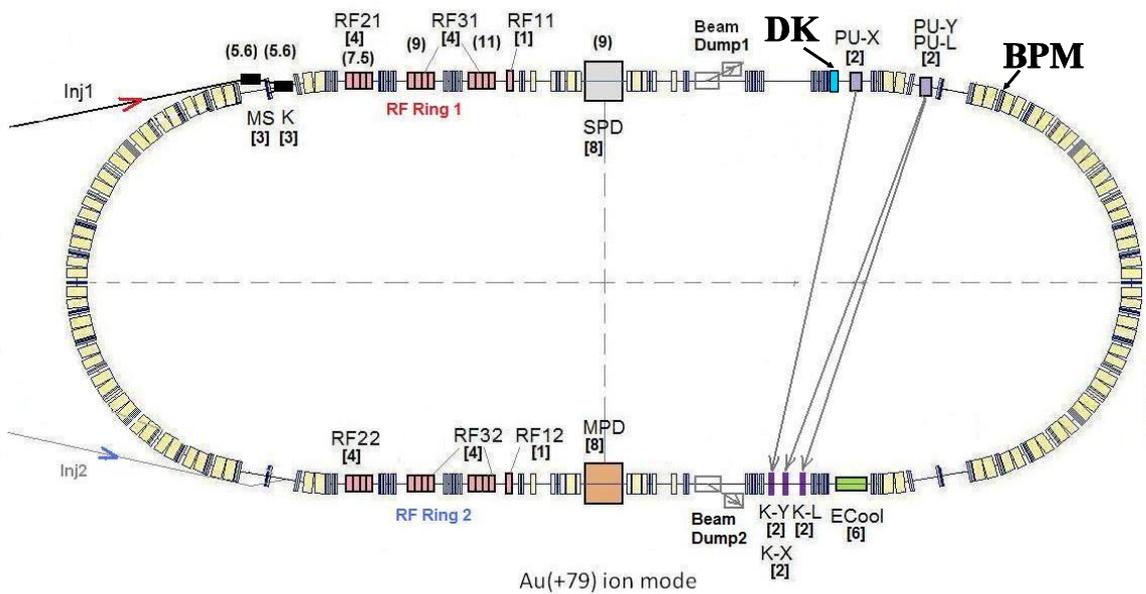


Рис. 7.9.3. Схема размещения DK и BPM для СП в одном кольце Коллайдера NICA

Дефлекторы DK предлагается расположить (см. Рис. 7.9.3) в конце тёплого длинного прямолинейного промежутка (перед PU-X), где для оценок можно принять $\beta_k = 20$ м (см. Рис. 7.9.4). Измерительные датчики BPM в этом случае должны располагаться недалеко от DK по ходу пучка, то есть вблизи начала сверхпроводящей арки Коллайдера, где для оценок можно принять $\beta_p = 17$ м.

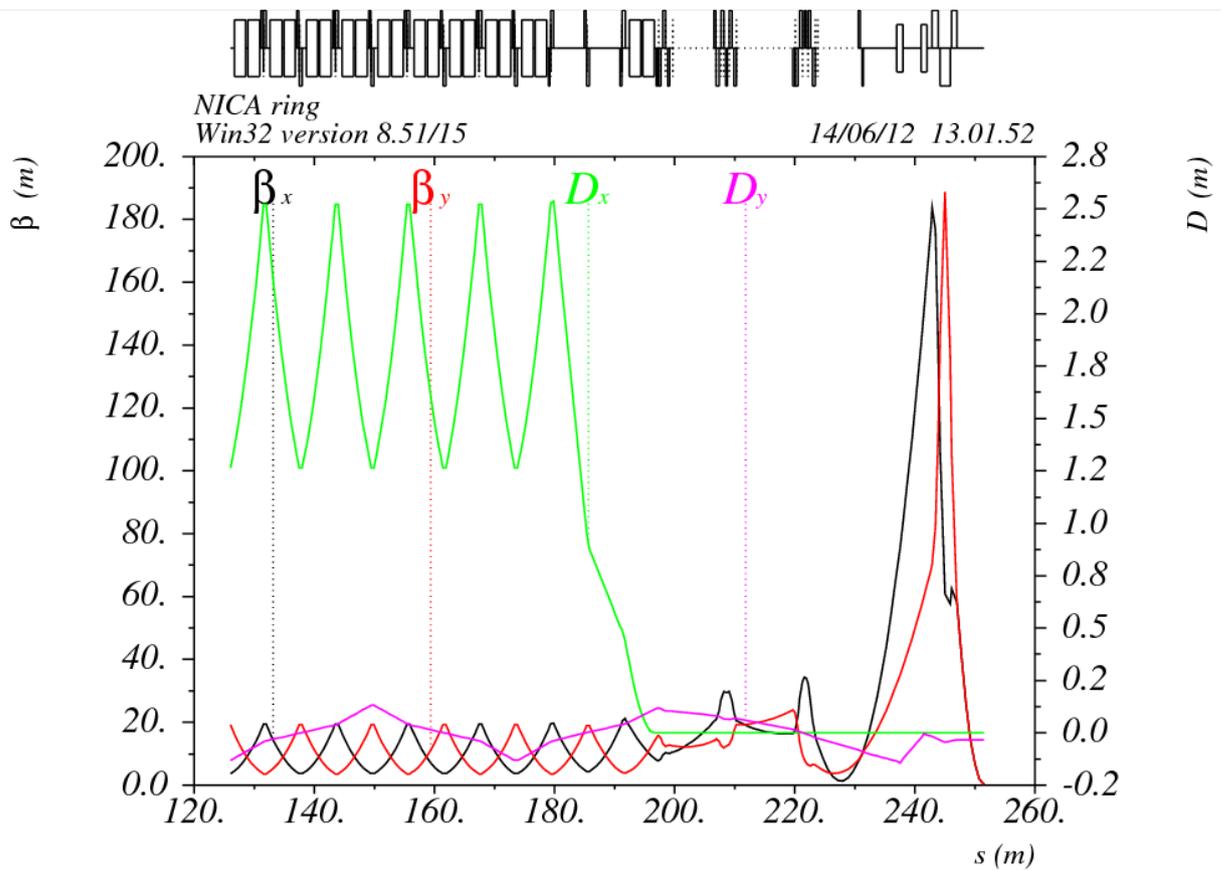


Рис. 7.9.4. Структурные функции в Коллайдере NICA

Величина коррекции $\Delta x'_k$ угла наклона траектории сгустка в ДК пропорциональна смещению x_p центра тяжести этого же сгустка в BPM:

$$\Delta x'_k = g x_p / (\beta_p \beta_k)^{1/2},$$

где g — коэффициент обратной связи. В классической СП логарифмический декремент затухающих когерентных поперечных колебаний за оборот α при $g \ll 1$ для колебаний, незначительно отличающихся по частоте от частоты бетатронных колебаний и её комбинаций с гармониками частоты обращения, при оптимальной настройке баланса фаз ψ управляющего сигнала обратной связи (когда $|\sin \psi_{opt}| = 1$ и декремент максимален) есть [7.8, 7.9]:

$$\alpha_{opt} = g/2 = T_{rev}/\tau_d.$$

Таким образом, расчётная величина коэффициента обратной связи СП при $\tau_d = 100 T_{rev}$ (см. Таблице 7.9.1) есть $g = 0,02$. Поэтому дефлектор должен обеспечивать изменение угла наклона траектории за оборот $\Delta x'_k = 9,1$ мкрад, что в среднем эквивалентно изменению амплитуды когерентных поперечных колебаний за оборот $\Delta x_k = 0,01 \sigma_k$, где среднеквадратичный размер пучка при инжекции в месте расположения дефлектора есть $\sigma_k = 3,8$ мм.

В Таблице 7.9.2 приведён перечень основных характеристик корректирующего дефлектора СП при демпфировании когерентных поперечных колебаний ионного пучка $^{197}\text{Au}^{79+}$. При этом считалось, что для обеспечения требуемой величины постоянной затухания когерентных поперечных колебаний $\tau_d = 100 T_{\text{rev}}$ (см. Таблице 7.9.1) используется оптимальная расстановка BPM и DK, а соответствующие структурные функции есть $\beta_p = 17$ м и $\beta_k = 20$ м.

Таблица 7.9.2. Перечень основных параметров дефлектора СП для ионного пучка $^{197}\text{Au}^{79+}$

Параметр			значение
Изменение угла наклона траектории за оборот, которое должен обеспечивать дефлектор СП при инжекции	$\Delta x'_k$	мкрад	9,1
Дефлектор ($\beta_k = 20$ м): апертура/длина	D_k/L_k	мм	100/1000
Максимальное напряжение на пластинах дефлектора электростатический дефлектор	V_k	кВ	3,4

Для оценок максимальных величин корректирующего воздействия выбран вариант СП с электростатическим дефлектором, на пластины которого должно подаваться требуемое напряжение V_k . Следует отметить, что сильное различие в величинах β_p и β_k приводит к необходимости увеличения V_k . Однако по величине это напряжение даже несколько ниже выходного напряжения мощного широкополосного пушпульного усилителя, созданного в ЛФВЭ ОИЯИ для СП на Коллайдере ЛНС, где получено $V_k = 11$ кВ на частоте 100 кГц и $V_k = 7,8$ кВ на частоте 1 МГц [7.10]. Поскольку требуемая длина пластин дефлектора $L_k = 1$ м в СП на Коллайдере NICA в полтора раза меньше, чем в случае ЛНС, то можно прогнозировать, что необходимая частота среза 2,8 МГц может быть получена, если в качестве прототипа мощного усилителя использовать усилитель, созданный для СП на ЛНС, после соответствующей его доводки. Требуемая импульсная переходная характеристика для мощного усилителя СП на Коллайдере NICA в идеальной ситуации, соответствующей минимальному расстоянию между сгустками около 71 нс, может стать заметной проблемой. Однако в проекте NICA нет никаких указаний о режиме работы с 24 сгустками (полное заполнение орбиты) как с независимыми объектами. Поэтому требование к импульсной переходной характеристике можно соотносить с временем нарастания сигнала $\Delta t_r = 125$ нс, что соответствует выше указанной частоте среза 2,8 МГц.

При инжекции, когда период обращения ионов $T_{\text{rev}} = 1,915$ мкс, такая импульсная переходная характеристика СП позволяет осуществлять подавление когерентных поперечных колебаний инжектируемого сгустка, возникающих из-за ошибок инжекции, практически не задевая накопленный пучок, заполняющий половину орбиты.

Таким образом, в каждой плоскости поперечных колебаний необходимо иметь цепь обратной связи BPM \rightarrow electronix \rightarrow DK, которую далее будем именовать ЦОС СП. На Рис. 7.9.5 приведены схемы ЦОС СП с учетом схемотехнических решений, успешно использованных в СП на Коллайдере ЛНС [7.7]. Здесь используются два специализированных цифровых модуля: BPosM и DSPU.

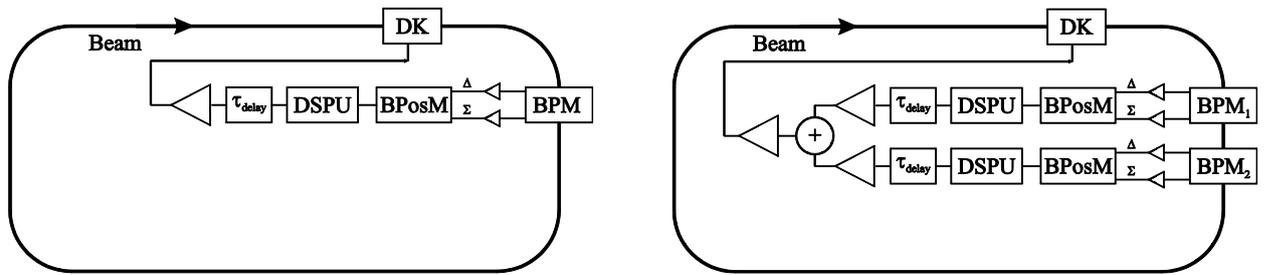


Рис. 7.9.5. Схема ЦОС СП с одним (слева) и двумя (справа) измерительными датчиками

В модуле BPosM осуществляется I/Q демодуляция входных разностного Δ и суммового Σ сигналов, пропорциональных смещению и интенсивности сгустка. Затем производится оцифровка получающихся четырёх сигналов. Эти цифровые сигналы нормализуются, в результате чего возникает цифровой сигнал Δ/Σ , пропорциональный смещению центра тяжести сгустка.

В модуле DSPU устанавливается оптимальный фазовый сдвиг для цифрового сигнала Δ/Σ , осуществляется синхронизации этого сигнала с моментом пролёта сгустком дефлектора, производится коррекция амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик ЦОС СП с целью обеспечения превышения декремента затухающих колебаний над инкрементом неустойчивости во всей полосе частот. На выходе DSPU формируется аналоговый сигнал, который передаётся на оконечные каскады СП.

Использование цифровых методов обработки и формирования требуемых сигналов возможно при соблюдении требований к разрядности аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в ЦОС СП, поскольку квантование неизбежно приводит к шумам, влияющим на время жизни пучка. В работах [7.11, 7.12] приведена следующая оценка темпа роста эмиттанса:

$$(\tau_{x2})^{-1} = (4/3) f_{rev} \alpha^2 \Delta Q^2,$$

где τ_{x2} — постоянная времени роста эмиттанса, ΔQ — величина разброса числа бетатронных колебаний, $\alpha = 2^{-(b-1)}$ — коэффициент, учитывающий шумы квантования в цифровой системе с числом бит b . Так, при наличии в цепи обратной связи 16-разрядных АЦП с числом эффективных бит $b = 14$ имеем $\tau_{x2} = 900$ часов при $f_{rev} = 590$ кГц и $\Delta Q = 5 \times 10^{-3}$. Таким образом, для Коллайдера NICA при существующей элементной базе цифровых устройств можно обеспечить приемлемое время циркуляции пучка без заметного роста эмиттанса.

Для циркулирующих в Коллайдере сгустков дискретное представление сигнала с BPM, пропорционального когерентным смещениям пучка от равновесной орбиты, в виде последовательности отсчётов, формируемых на каждом обороте с максимальной частотой ниже f_{rf} , в соответствии с теоремой Котельникова однозначно возможно при использовании в качестве тактовой частоты $f_{clk} = f_{rf}$. При этом необходимо вычислять величину задержки τ_{delay} с учётом

изменения продольной скорости сгустка при изменении энергии ускоряемых ионов, что возможно и подтверждено практическими разработками [7.8, 7.12, 7.20].

Известно, что в СП с использованием аналоговой электроники оптимальные фазовые соотношения для баланса фаз ψ обеспечиваются с помощью двух датчиков положения, сдвинутых на четверть длины волны бетатронных колебаний, в результате чего возникает оптимальная цепь обратной связи между виртуальным датчиком положения и дефлектором. В СП с цифровой электроникой оптимальные фазовые соотношения для баланса фаз ψ можно обеспечить с помощью одного датчика положения и соответствующей цифровой обработки сигнала [7.7, 7.8]. Вместе с тем следует отметить, что устойчивость работы СП зависит от соотношения сигнал/шум в радиотехнической части цепи обратной связи. Использование нескольких датчиков положения на входе СП улучшает это соотношение. Поэтому предлагается реализовать СП с двумя цепями обратной связи (см. Рис. 7.9.5), обрабатывая аналоговые сигналы с двух датчиков положения и суммируя их перед подачей на оконечные усилители СП. При этом каждая цепь обратной связи может быть настроена с пучком независимо друг от друга. Суммирование оптимальных сигналов в аналоговом виде способствует улучшению соотношения сигнал/шум, что может оказаться полезным при ускорении ионных сгустков низкой интенсивности.

В Коллайдере NICA рабочая точка по Q выбрана вблизи полуцелого числа. На синхротроне SPS CERN, где $Q_x \approx 26,62$ и $Q_y \approx 26,58$ замечено, что при некоторых настройках наблюдается нежелательное увеличение эмиттанса пучка, возникающее из-за ошибок инжекции [7.13]. Причина заключается в том [7.14], что непосредственно после инжекции пучка возможна ситуация, когда сгусток проходит измерительный датчик BPM без смещения, в результате чего на дефлектор не поступает корректирующий сигнал. Вследствие близости Q к полуцелому числу данная ситуация сохраняется в течение нескольких оборотов, инициируя неустойчивость пучка и рост его эмиттанса. Для устранения этого эффекта была осуществлена модернизация СП на SPS [7.13] и установлена быстрая система подавления когерентных поперечных колебаний пучка в синхротроне (см. Рис. 7.9.2), которая была впервые предложена и создавалась для первой ступени ускорительно-накопительного комплекса в ИФВЭ (Протвино) [7.15]. В быстрой СП для коррекции угла наклона траектории используются два дефлектора, сдвинутых на четверть длины волны бетатронных колебаний относительно друг друга. В связи с близостью Q к полуцелому числу в Коллайдере NICA предлагается создавать СП в конфигурации быстрой СП. Поскольку для быстрой СП имеем $T_{rev}/\tau_d = g$ при оптимальной расстановке всех датчиков и дефлекторов [7.16], то при напряжении $V_k = 3,4$ кВ на пластинах дефлектора их длина может быть в два раза меньше: $L_k = 500$ мм. Возможен также вариант с сохранением длины пластин дефлектора и в два раза меньшей величине напряжения $V_k = 1,7$ кВ на его пластинах. Второй вариант является более предпочтительным, поскольку наличие резервных возможностей вполне оправдано.

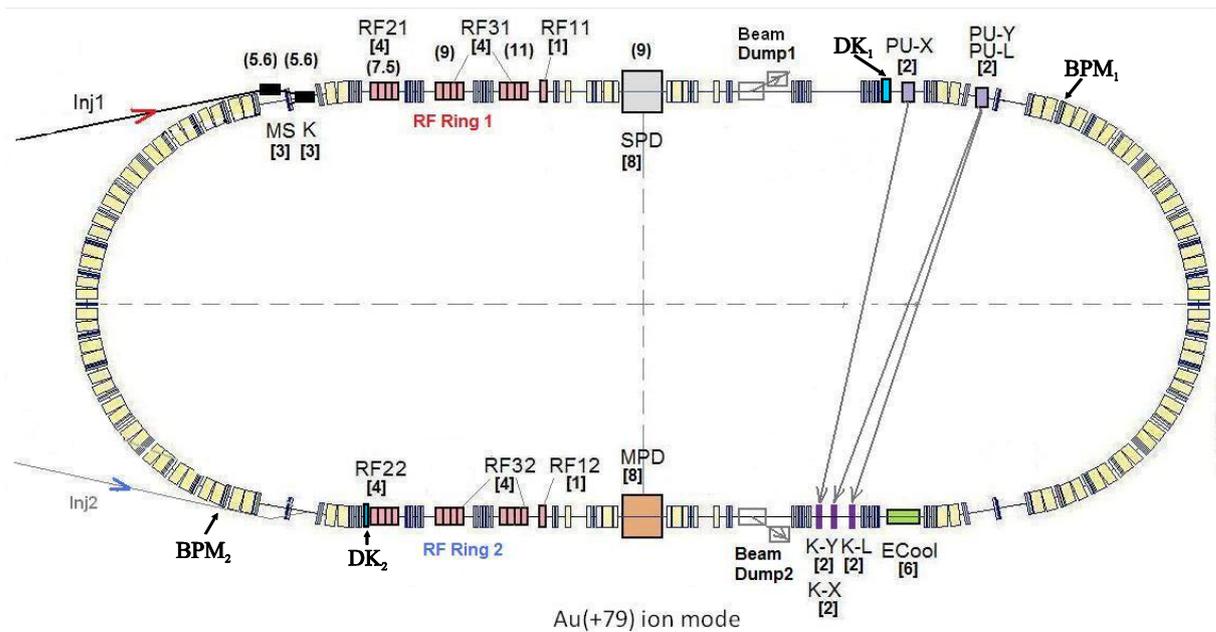


Рис. 7.9.6. Схема размещения DK и BPM быстрой СП в одном кольце Коллайдера NICA

Для классической СП требуется размещение в каждом кольце двух дефлекторов ($L_k^{(y)} + L_k^{(x)} = 2$ м) в конце прямолинейного промежутка перед влётом в сверхпроводящую арку (см. Рис. 7.9.3). Для быстрой СП требуется размещение в каждом кольце четырёх дефлекторов в двух диаметрально противоположных прямолинейных участках перед влётом в сверхпроводящую арку (см. Рис. 7.9.6). При этом можно надеяться, что удастся обеспечить устойчивое функционирование СП в широкой области частот при изменении положения рабочих точек по Q, учитывая успешный результат более чем десятилетней работы быстрой СП на SPS [7.13].

Таким образом, при реализации классической СП требуется создать 4 дефлектора с мощными широкополосными усилителями, на которые поступают сигналы с 8 датчиков положения, аналоговые сигналы с которых обрабатываются в 8 цепях обратной связи с цифровой обработкой сигнала. Для быстрой СП требуются 8 дефлекторов и 16 цепей обратной связи. При этом в каждой цепи обратной связи будет применяться однотипное радиотехническое оборудование. Для измерения параметров замкнутой орбиты требуется значительное число датчиков положения, каждый из которых может быть использован для СП. В то же время дефлекторы с мощными широкополосными усилителями не являются стандартным оборудованием. Поэтому решение о выборе классической или быстрой конфигураций СП должно диктоваться требованиями работоспособности Коллайдера в расчётных режимах.

7.9.4 Цифровая обработка сигнала в СП

В каждой цепи обратной связи для формирования требуемых фазовых соотношений в настоящее время успешно применяются цифровые методы с использованием цифровых фильтров

(см. Рис. 7.9.7). Требуемые фазовые соотношения для получения оптимального баланса фаз подбираются при выборе передаточной функции фильтра.

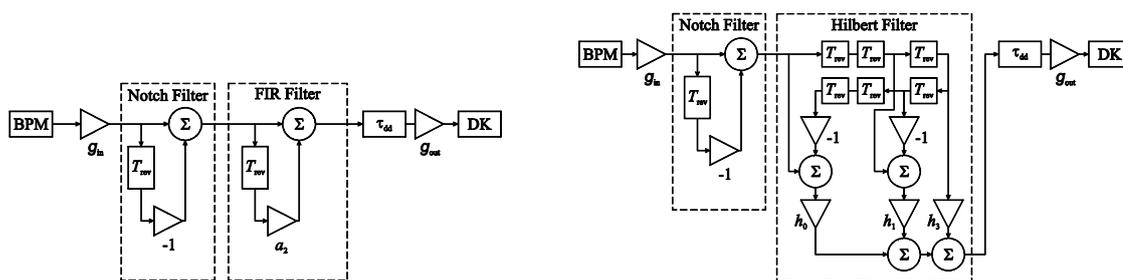


Рис. 7.9.7. Схема цифровой части DSP для формирования требуемых фазовых сдвигов

В электронных Коллайдерах применяются последовательно соединённые узкополосный заграждающий фильтр (Notch) и фильтр первого порядка (FIR) с конечной импульсной характеристикой [7.17]. В аналоговой СП для синхротрона SPS используются последовательно соединённые узкополосный заграждающий фильтр (Notch) и фильтр Гильберта [7.18]. Эта же комбинация успешно используется в цифровой СП на Коллайдере LHC с тактовой частотой 40 МГц [7.19].

Прототип цифрового фильтра Notch + FIR первого порядка с тактовой частотой 110 МГц (для Коллайдера NICA достаточна тактовая частота 45 МГц) был создан в ЛФВЭ ОИЯИ и успешно настроен на специализированном лабораторном стенде [7.20].

Оптимальный баланс фаз ψ при заданном набеге фазы η бетатронных колебаний от BPM до DK обеспечивается подбором соответствующих коэффициентов при использовании фильтра Гильберта или FIR фильтра первого порядка. Никаких принципиальных соображений о преимуществе ЦОС СП с FIR фильтром первого порядка перед её аналогом с фильтром Гильберта в литературе не приводится. Реализация DSPU с применением программируемой пользователем вентильной матрицы (FPGA) обеспечивает требуемую гибкость при использовании различных схем цифрового фильтра путём перепрограммирования FPGA. Поэтому окончательный выбор для цифрового фильтра может быть осуществлён при настройке СП Коллайдера с пучком.

В СП на Коллайдере LHC в течение его эксплуатации после запуска в 2009 г. режимы ЦОС СП неоднократно перестраивались во всех 16 цифровых модулях DSPU с учётом особенностей схемы синхронизации и выбора рабочей точки по частоте бетатронных колебаний при инжекции и столкновениях. При этом настраиваемым параметром являлась величина сдвига фаз $\Delta\phi$ в фильтре, которая практически совпадала с теоретически предсказанным значением. Поэтому можно надеется, что проблем с обеспечением оптимальных условий для СП на Коллайдере NICA при реализации предлагаемой конфигурации ЦОС СП не будет. В настоящем документе не приводится

конкретная таблица с предсказаниями величин $\Delta\phi$, что связано исключительно с отсутствием необходимых данных для набегов фаз η для принятой расстановки измерительных датчиков и дефлекторов.

Вместе с тем необходимо отметить, что в случае выбора комбинации Notch + Hilbert в ЦОС СП возникают дополнительные требования по стабилизации положения рабочей точки [7.8, 7.22]. Так, при отклонении положения рабочей точки до Q^* от расчётного значения $Q = 9,44$ в сторону больших значений возникает естественное ограничение, обусловленное параметрическим резонансом. При отклонении положения рабочей точки до Q^* от расчётного значения $Q = 9,44$ в сторону меньших значений уменьшается темп подавления когерентных поперечных колебаний. Поскольку выше предполагалось, что максимальная величина напряжения V_k на пластинах дефлектора неизменна при изменении энергии, то устойчивость сгустка $\tau_d < \tau_{inst}$ будет обеспечена при отклонениях по Q не более чем на 0,04. Данное ограничение необходимо учитывать при выборе систем стабилизации по Q или при изменении положения рабочей точки (например, изменение Q на 0,01 на ЛНС при переходе к режиму столкновений сопровождается изменением величин $\Delta\phi$, при этом стабильность положения выбранной рабочей точки составляет $\pm 0,005$).

7.9.5 Перечень основного оборудования

Перечень основного оборудования для одной цепи обратной связи СП приведён в Таблице 7.9.3. Как уже отмечалось выше, для цифровой электроники достаточно использовать 16 разрядные компоненты. Для тактовой частоты в ЦОС СП достаточно иметь $f_{clk} = f_{rf} < 45$ МГц.

Таблица 7.9.3. Перечень основного оборудования для одной цепи обратной связи СП

Наименование	Кол.	Примечание
Датчик положения	1	типовой датчик
Маломощный входной усилитель до 1 В на 50 Ом	2	стандартный
Цифровой модуль VposM	1	требуется разработка
Модуль цифровой обработки сигнала DSPU	1	имеется прототип
Выходной усилитель до 10 В на 50 Ом	1	стандартный
Выходной предусилитель до 150 В на 50 Ом	2	стандартный
Мощный выходной усилитель: 3,4 кВ (нагрузка — электростатический дефлектор)	1	имеется прототип
Дефлектор	1	имеется прототип

Из данных, приведённых в Таблице 7.9.3, ясно, что большинство узлов являются стандартными или имеются прототипы с параметрами, близкими к требуемым. В ЛФВЭ ОИЯИ имеется необходимая документация и готовые устройства, которые были созданы при реализации СП на ЛНС и могут быть использованы при создании СП на Коллайдере NICA. Для цифрового модуля VPosM в качестве прототипа можно использовать цифровой модуль VPosM, функционирующий в составе ЦОС СП на ЛНС.

7.9.6 Заключение

В настоящем документе приведено физико-техническое обоснование системы подавления когерентных поперечных колебаний пучка в Коллайдере NICA. Представленные данные достаточны для привязки всех устройств СП к основным структурным узлам Коллайдера.

ЛИТЕРАТУРА

- [7.1] G.V. Trubnikov et al., Project of the Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // Proc. of Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2010), Protvino, Russia, 2010, p. 17-20.
- [7.2] O. Kozlov et al., Collider of the NICA accelerator complex: optical structure and beam dynamics // Proc. of Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2012), St. Petersburg, Russia, 2012, p. 278-280.
- [7.3] H.G. Khodzhbagiyan et al., Status of the design and test of superconducting magnets for the NICA project // Proc. of Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC 2012), St. Petersburg, Russia, p. 149-151.
- [7.4] MAD — Methodical Accelerator Design, <http://madx.web.cern.ch/madx/>.
- [7.5] H.G. Khodzhbagiyan, A.A. Smirnov “The concept of a superconducting magnet system for the Nuclotron”, Proc. of the Twelfth Int. Cryogen. Eng. Conf., ICIC12, Southampton, 1988, pp. 841-844.
- [7.6] Brüning O.S. et al. The LHC Design Report. Vol. 1. CERN-2004-003, CERN, Geneva. 2004.
- [7.7] Zhabitsky V.M. et al. Beam Tests of the LHC Transverse Feedback System // Proc. of XXII Russian Particle Accelerators Conference RuPAC-2010, 27 September – 1 October 2010, Protvino, Russia. IHEP, Protvino, 2010. pp. 275-279.
- [7.8] Жабицкий В.М. Динамика пучка в синхротронах с цифровыми широкополосными системами подавления когерентных поперечных колебаний заряженных частиц // ЭЧАЯ. 2014. Т. 45, № 2. С. 806-874.
- [7.9] Жабицкий В.М. Отклик пучка на переходный процесс в синхротронах с цифровой системой подавления когерентных поперечных колебаний // Препринт ОИЯИ Р9-2012-28. Дубна. 2012. 12 с.
- [7.10] Gorbachev E.V. et al. LHC Transverse Feedback System: First Results of Commissioning // XXI Russian Particle Accelerators Conference RuPAC-2008, 28 September – 3 October 2008, Zvenigorod, Russia. Moscow, 2008. pp. 97-100.
- [7.11] Boussard D. Evaluation of transverse emittance growth from damper noise in collider: SL/Note 92-79, LHC Note 218: CERN, Geneva, 1992.
- [7.12] Rossi V. Digital Signal Processing. Applications and Implementation for Accelerators. Digital Notch Filter with Programmable Delay and Betatron Phase Adjustment for the PS, SPS & LHC Transverse Dampers. Workshop on DSP Applications in the SL Division. CERN-SL-2002-047 (HRF). 2002. 48 p.

- [7.13] Höfle W. Progress with the SPS Damper // Proceedings of Chamonix XI, January 2001. CERN, Geneva, CERN-SL-2001-003 DI, 2001. pp. 117-124.
- [7.14] Zhabitsky V.M., Höfle W., Kotzian G. Beam Stability in Synchrotrons with Notch and All-Pass Filters in the Feedback Loop of a Transverse Damper // CERN-BE-2009-013. Geneva. 2009. 29 April. 12 p.
- [7.15] Ivanov I.N. et al. Requirements to the Feedback System to Damp Resistive Instability (I Stage UNK) // Proc. of the XVth International Conference on High Energy Accelerators, 20-24 July 1992, Hamburg, Germany. Vol. II. World Scientific, 1993. pp. 1034-1036.
- [7.16] Жабицкий В.М. и др. Подавление резистивной неустойчивости в I ступени УНК при цифровой обработке сигнала в цепи обратной связи // Сообщение ОИЯИ Р9-91-99. Дубна. 1991. 12 с.
- [7.17] Lonza M. Multi-bunch feedback system // CAS — CERN Accelerator School: Digital Signal Processing, 31 May – 9 June 2007, Sigtuna, Sweden. CERN-2008-003, Geneva, 2008. pp. 285-330.
- [7.18] Rossi V. Digital Signal Processing for 1-Turn Delay Feedback Systems of the CERN Accelerator Chain: CERN-BE-2009-009: CERN, Geneva, 2009. 24 p.
- [7.19] Höfle W. et al. LHC Damper Beam Commissioning in 2010 // Second International Particle Accelerator Conference IPAC-2011, 4-9 September 2011, San Sebastian, Spain. The European Physical Society Accelerator Group (EPS-AG), 2011. pp. 505-507. CERN-ATS-2011-033, Geneva, 2011.
- [7.20] Gorbachev E., Lebedev N., Zhabitsky V. Implementing elements of digital transverse feedback system in Altera FPGA // XXI Russian Particle Accelerators Conference RuPAC-2008, 28 September-3 October 2008, Zvenigorod, Russia. Moscow, 2008. pp. 6-8.
- [7.21] Жабицкий В.М. Устойчивость ионного пучка в синхротронах с цифровыми системами подавления когерентных поперечных колебаний // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7, вып. 7(163). С. 742-747.
- [7.22] Zhabitsky V.M. Beam Stability in Synchrotrons with Digital Transverse Feedback System in Dependence on Beam Tunes // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2012. Vol. 9, No.4-5. pp. 337-341.