

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
ядерных исследований Российской академии наук



На правах рукописи
УДК xxx.xxx

Колокольчиков Сергей Дмитриевич

**Исследование динамики поляризованного пучка в
ускорительном комплексе NICA-Nuclotron в приложении
к изучению электрического дипольного момента легких
ядер**

Специальность 1.3.2 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
профессор, доктор физико-математических наук
Сеничев Юрий Валерьевич

Москва — 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Особенности двойственной магнитооптической структуры для ускорения тяжелых ионов и легких частиц частиц	18
1.1 Выбор критической энергии в магнитооптической структуре с учетом ускорения тяжелых ионов и легких частиц.	18
1.1.1 Критическая энергия	19
1.1.2 Адаптация структуры для эксперимента с легкими поляризованными частицами	20
1.2 Оптимизация времени жизни пучка	21
1.2.1 Стохастическое охлаждение	22
1.2.2 Внутрипучковое рассеяние в регулярной, резонансной и комбинированной структурах	27
Глава 2. Прохождение критической энергии в регулярной магнитооптической структуре синхротрона	31
2.1 Построение регулярной структуры на основе ячеек ФОДО, ФДО, ОДФДО	32
2.1.1 Подавление дисперсии в регулярных арках с missing magnet и/или квадрупольями с варьируемыми градиентами	33
2.2 Прохождение критической энергии	34
2.2.1 Численное моделирование динамики продольного движения	34
2.2.2 Стабильность продольного фазового движения вблизи критической энергии	35
2.2.3 Влияние индуктивного импеданса	36
2.2.4 Процедура скачка критической энергии	40
2.3 Особенности процедуры скачка критической энергии в синхротроне У-70	41
2.4 Особенности процедуры скачка критической энергии в синхротроне NICA для протонного пучка	45

2.4.1	Обеспечение стабильности пучка с точки зрения динамической апертуры при процедуре скачка критической энергии	48
2.4.2	Оценка возможности использования гармонического ВЧ .	48
2.4.3	Применение барьерного ВЧ	51
2.4.4	Продольная микроволновая неустойчивость	56
2.4.5	Сохранение поляризации при прохождении критической энергии	58
Глава 3. Регулирование критической энергии методом резонансной вариации дисперсионной функции		62
3.1	Введение суперпериодической модуляции	63
3.2	Построение резонансной структуры на основе ячеек ФОДО, ФДО, ОДФДО	65
3.3	Регулярная ФОДО структура с суперпериодической модуляцией градиентов линз	67
3.4	Подавление дисперсии на краях поворотных арок	68
3.4.1	Полностью регулярная магнитооптическая структура . .	70
3.4.2	Подавление дисперсии при помощи крайних суперпериодов	70
3.4.3	Подавление дисперсии всей аркой, при помощи выбора градиентов квадрупольей двух семейств.	71
3.5	Исследование динамической апертуры в синхротроне с учетом требуемой модуляции дисперсионной функции для повышения критической энергии	74
Глава 4. Возможности изучения ЭДМ легких поляризованных пучков заряженных частиц		77
4.1	Орбитальная и спиновая динамика в электромагнитных полях .	81
4.2	Общий концепт квази-замороженной структуры	83
4.2.1	Эффективная длина элемента, компенсирующего МДМ-вращение	84
4.3	Определение оптимальной энергии эксперимента	85
4.4	Влияние сорта частиц на особенности спиновой динамики	86

4.4.1	Применение прямого фильтра Вина со скрещенными полями	89
4.4.2	Применение электростатического дефлектора и дополнительного киккера	90
4.5	Применение концепции квази-замороженного спина в действующих ускорительных установках	92
4.6	Использование Nuclotron в качестве бустера легких поляризованных частиц в коллайдер NICA	93
4.6.1	Требования к магнитооптической структуре синхротронов Nuclotron-NICA в задаче исследования электрического дипольного момента легких ядер	94
4.6.2	Текущая магнитооптика Nuclotron	95
4.6.3	Модернизированная восьмипериодическая структура	97
4.6.4	Модернизированная 16-периодическая структура	98
4.7	Предпосылки модернизации главного кольца NICA	101
4.7.1	Первичная схема с 3 квадрупольями	103
4.7.2	Модернизированная схема с 5 квадрупольями	104
4.7.3	Адаптированный вариант	105
4.8	Спин-орбитальный трекинг в магнитном кольце со скрещенными E+B элементами	107
4.8.1	Декогеренция спина	108
4.8.2	Секступольная коррекция	109
4.8.3	Коррекция высших порядков	112
Заключение		116
Словарь терминов		118
Список литературы		119
Список рисунков		128
Список таблиц		133

Введение

Данная работа посвящена исследованию стабильности динамики тяжелых ионов, а также поляризованных пучков в ускорителях и накопителях. Также будут разобраны вопросы проектирования современных ускорительных установок.

Использование ускорительных установок для проведения разнообразных экспериментов представляет собой значительное преимущество. Эти установки позволяют достигать высоких энергий частиц, а также предельных точностей измерений. Такая практика применяется в крупных мировых ядерных центрах: CERN [1], BNL [2], J-PARC [3]. Последовательные программы экспериментов расписаны на годы и десятилетия вперед. Такие установки в первую очередь служат для фундаментальных исследований, но также поддерживают широкий спектр прикладных задач в таких областях, как медицина, материаловедение, и информационные технологии. Кроме того, ускорительные комплексы способствуют развитию необходимых технологий, что укрепляет научно-техническую базу и формирует долгосрочные положительные эффекты. Они также служат важной образовательной платформой, формируя программы для обучения молодых специалистов и предоставляя уникальные возможности для их профессионального роста.

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) является современным передовым центром, формирующимся на базе ОИЯИ в городе Дубна, Россия [4]. Основной установкой комплекса является коллайдер, в котором предусмотрены два места встречи пучков, где расположены два детектора: MPD (Multi-Purpose Detector) [5] и SPD (Spin Polarized Detector) [6]. Каждый из этих детекторов предназначен для различных экспериментов. MPD-детектор будет использован для исследования кварк-глюонной плазмы, возникающей в результате столкновений тяжёлых ионов. SPD-детектор направлен на изучение поведения сталкивающихся поляризованных пучков протонов и дейtronов. Таким образом, структура коллайдера должна поддерживать ускорение как тяжёлых ионов, так и лёгких частиц. При этом требования к удержанию пучков для различных типов частиц существенно отличаются.

Основным требованием коллайдерных экспериментов, является достижение большого количества соударений, то есть высокого уровня светимости. Для

исследования кварк-глюонной плазмы это требование должно быть на уровне $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Такие светимости являются рекордными и для их достижения может потребоваться существенная настройка всех систем ускорителя, что может потребовать большого времени. При ускорение тяжелых ионов высокая зарядность и интенсивность пучка вызывает серьёзные ограничения на параметры сгустка из-за внутрипучкового рассеяния (ВПР). Для преодоления этих проблем, спроектированная структура должна обладать высоким временем ВПР, а также содержать специальные установки стохастического и электронного охлаждения. Стохастическое охлаждение также в существенной степени зависит от конкретной магнитооптики установки и может быть оптимизировано для компенсации эффектов ВПР. Электронное охлаждение применяется на небольших энергиях сгустка и способно охладить пучок на начальных этапах ускорения.

Для изучения спиновой структуры протонов и дейtronов на детекторе SPD со светимостью $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ необходима подготовка и ускорение поляризованных пучков, что представляет особый интерес. Поляризация пучка является дополнительной степенью свободы и может привнести дополнительную информацию, в том числе в коллайдерные эксперименты. В этом случае определенные сечения рассеяния приобретают зависимость от поляризации сталкивающихся сгустков. Поскольку соотношение заряда к массе для протона отличается по сравнению с тяжелыми ионами почти в два раза, то максимальная энергия эксперимента кратно увеличивается. Но в существующей магнитооптике, оптимальной для тяжелоионного эксперимента подобрано значение критической энергии таким образом, что столкновение происходит до критического значения и никаких проблем по её преодолению не возникает. Стоит отметить, что критическая энергия является важным параметром ускорительной установки и при проектировании дизайна структуры этому вопросу уделяется особое внимание. Таким образом, для протонов прохождение критической энергии становится важным параметром, ограничивающим параметры сгустка и требует принятия дополнительных мер по её преодолению.

При ускорении пучка относительно длительное нахождение вблизи критической энергии или её пересечение существенно влияет на динамику пучка и его стабильность. Нарушается адиабатичность продольного движения, существенными становятся нелинейные эффекты, затухание Ландау оказывается неспособно подавить возникающие возмущения, а наличие пространственного заряда и других импедансов оказывает влияние на развитие продольной микро-

волновой неустойчивости, нестабильности отрицательной массы и поперечной голова-хвост (head-tail) [7], [8]. В случае малых интенсивностей критическая энергия не оказывает значительного влияния на параметры сгустка. Проблема прохождения критической энергии является характерной для интенсивных сгустков с количеством частиц порядка $10^{10} - 10^{12}$. Высокая интенсивность в коллайдерных экспериментах, обусловлена требованиями по достижению высокого значения светимости. Однако, любое увеличение эмиттанса пучка приведет к снижению конечной светимости эксперимента. Влияние всех приведенных эффектов, ограничено временем нахождения вблизи критической энергией, в этой связи используются методы быстрого пересечения.

Классическим методом преодоления является процедура скачка критической энергии [9]. При этом изменяются параметры ускорителя для внесения соответствующего возмущения и резкого кратковременного скачка критической энергии в момент близости энергии сгустка к критическому значению. После скачка, параметры установки возвращаются к исходному значению до скачка с поправкой на увеличивающуюся энергию пучка. Однако, сложностью является непосредственное создание скачка с заданной величиной и темпом, что не всегда легко реализуемо. Возможный способ создания скачка критической энергии, состоит в изменении количества бетатронных колебаний или набега фазы, поскольку в случае регулярной структуры справедлива пропорциональность $\gamma_{tr} \sim v_x$. Такой метод может быть реализован путем создания возмущения в квадруполях. Этот подход был применен в 1969 году на установке PS (Proton Synchrotron), CERN [10]. Однако, его применение существенно ограничено возможностью сдвига рабочей частоты и тем самым устанавливает предел для величины скачка, а скорость изменения – на темп скачка. Другой метод основан на кратковременном возмущении дисперсионной функции, путем установки специальных квадруполей обратных полярностей, расположенных через один период друг от друга. Таким образом, происходит искажение дисперсии без сдвига частоты бетатронных колебаний. Такой метод реализован позднее в 1974 году, также в PS [11] и позволяет достигнуть большей величины и темпа измерения критической энергии.

Всё же существуют способы поднятия критической энергии выше конечной энергии эксперимента, что существенно упрощает эксплуатацию установки, а также не требует дополнительной манипуляции со структурой и пучком, однако, предъявляет особые условия при проектировании установки. Так,

создание отрицательного значения дисперсии на прямом участке может компенсировать ненулевую дисперсию в поворотных арках [12], [13]. Недостатком данного метода является его особенность – отсутствие бездисперсионного участка, что усложняет проектирование транспортных каналов для инжекции или экстракции пучка, а также в случае коллайдера наличие дисперсии в точке столкновения, что сказывается на светимости.

Альтернативным способом, который применяется для того чтобы избегать потери стабильности, является создание или модификация структуры с заведомо большим значением критической энергии. Такая структура носит название 'резонансной' [14], [15], впервые была предложена при проектировании каонной фабрики [16] и других установках мирового уровня Neutrino Factory в CERN [17] и было реализовано в J-PARC для главного кольца [18], [19]. Принципиальным отличием от регулярной структуры является обеспечение резонансного условия для количества суперпериодов и частоты бетатронных колебаний в горизонтальной плоскости. Однако, это справедливо только для не полностью регулярных структур, а содержащих регулярную модуляцию градиента квадрупольей или кривизны орбиты. В таком случае, происходит изменение оптических функций ускорителя и варьирование критической энергии выше энергии эксперимента, в том числе до комплексных значений, полностью убирая зависимость установки от дополнительных процедур преодоления. Такой подход позволяет получить нулевую дисперсию на прямых участках в силу подавления дисперсии на поворотных арках, путём выбора целого числа бетатронных колебаний и создания ахромата первого порядка. Кроме того, в подобной структуре может быть легко реализован и ахромат второго порядка расстановкой секступолей через один суперпериод. Подобный подход способствует достижению достаточного значения динамической апертуры.

Непосредственное ускорение поляризованных пучков протонов является отдельным большим направлением исследований, поскольку требует решения проблемы пересечения спиновых резонансов [20]. Стоит отметить, что спин является квантовой величиной, но в силу теоремы Эренфеста для любой квантовой величины может быть записано уравнение в квази-классическом приближении для ансамбля частиц. Поведение спина частицы в ансамбле описывается уравнением Т-БМТ [21]. Проекция спинов частиц на заданную ось и определяет поляризацию пучка. При ускорении до конечных энергий интерес представляют управление поляризацией пучка [22].

Особо сложным является создание когерентных пучков, а не просто поляризованных, что является передовым направлением исследований. В этом случае, сохраняется поляризация вдоль конкретной оси, а также спины частиц прецессируют с одинаковой частотой. Тогда появляется возможность исследовать также электрический дипольный момент (ЭДМ) элементарных частиц. Данная величина характеризует асимметрию распределения заряда частицы. Наличие ЭДМ объясняется тем, что он нарушает СР-симметрию, последнее было предсказано Сахаровым как одно из условий бариогенеза на ранних этапах вселенной [23]. Для накопления малой величины ЭДМ необходимо долгое удержание пучка с последующим анализом рассеяния на мишени на поляриметре. При этом влияние магнитного дипольного момента (МДМ) должно быть подавлено. Такая техника впервые была предложена в БНЛ (Брукхейвенская Национальная Лаборатория) и имеет название 'замороженный' спин [24]. Позднее, была предложена концепция 'квази-замороженного' спина [25], в которой происходит пространственное разделение полей и интегральное подавление МДМ-компоненты за полный оборот по кольцу.

Представленные исследования исходят из возможности изучения в комплексе NICA-Nuclotron. Построенный ускорительный комплекс является проектом мегасайнса и оборудован передовой материально-технической базой, отвечающей мировым тенденциям в ускорительной технике. Основными функционирующими установками помимо уже упомянутого коллайдера NICA являются бустер тяжелых ионов Booster, а также синхротрон Nuclotron.

В коллайдере NICA для реализации концепции квази-замороженного спина необходима установка соответствующего оборудования. Для реализации накопительного кольца из структуры коллайдера, необходима модернизация с созданием обходных каналов bypass. Таким образом, на полученных прямолинейных участках могут быть расположены прямые фильтры Вина, выполняющий функцию компенсации МДМ-компоненты в скрещенных магнитных и электрических полях, не возмущающие орбиту в силу равенства нулю силы Лоренца.

Nuclotron является бустером поляризованных частиц в коллайдер, однако, требующим модернизации. Соответствующий концепт модернизации рассмотрен с точки зрения использования Nuclotron в тесной связке с коллайдером NICA. Использование Nuclotron для полноценных спиновых экспериментов делает эту машину столь же интересной, сколько и отдельные программы на

коллайдере. Кроме того, особенности магнитооптики Nuclotron открывают возможность измерение ЭДМ не только дейтрона, но и протона, однако, при несколько меньшей энергии. На текущий день измерений ЭДМ как дейтрона, так и протона не было осуществлено и представляется передним краем физического эксперимента на ускорительной установке.

Ещё одним направлением исследований в рамках формирующейся программы спиновой физике является исследование аксиона. В этом случае резонансным методом между частотой спиной прецессии и частотой осцилирующего скалярного акционного поля может быть получена масса аксиона или установлены соответствующие ограничения. Для этого ускоритель будет использован в роли зондирующей антенны по частоте прецессии спина [26].

Исследования направлены на формирование полноценной физической программы по изучению динамики поляризованных пучков в комплексе Nuclotron-NICA. Применение изложенных в работе подходов возможно и на других похожих установках без потери общности.

Целью данной диссертации является изучение особенностей динамики многозарядных тяжёлоионных и лёгких поляризованных пучков для проведения коллайдерных экспериментов в дуальной структуре, а также исследования электрического дипольного момента с использованием квази-замороженной концепции. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Расчёт времени внутрипучкового рассеяния для тяжелых ионов;
2. Оценка влияния методов с стохастического охлаждения пучка на время жизни;
3. Моделирование магнитооптики с модулированной дисперсионной функцией;
4. Проведение численного моделирования продольной динамики частиц с учетом высших порядков коэффициента уплотнения орбиты в высокочастотных резонаторах гармонического и барьера типа;
5. Обеспечение стабильности пучка с точки зрения динамической апертуры при процедуре скачка критической энергии, подавление хроматичности, компенсация нелинейных эффектов;

6. Сохранение поляризации пучка при совершении процедуры скачка критической энергии;
7. Изучение концепции «квази-замороженного» спина с целью создания установки для исследования ЭДМ дейтрана и протона;
8. Спин-орбитальное моделирование в магнитном кольце с дополнительными элементами со скрещенными магнитными и электрическими полями;

Научная новизна:

1. Исследованы закономерности динамики многозарядных тяжёлых ионов и лёгких поляризованных частиц в дуальной магнитооптической структуре с учётом различий во внутрипучковом рассеянии и влияния критической энергии на устойчивость пучка;
2. Предложен метод резонансной модуляции дисперсионной функции с применением дополнительного семейства квадрупольных линз, что позволило повысить критическую энергию и стабильность пучка в режиме ускорения лёгких частиц;
3. Приведены способы подавления дисперсии на краях поворотных арок в отсутствии регулярности, а также способы подавления нелинейных эффектов;
4. Выполнено численное моделирование прохождения критической энергии с учётом высших порядков зависимости от импульсного разброса, а также влияния импедансов, что позволило количественно оценить влияние данных факторов на сохранение пучка;
5. Исследована продольная динамика поляризованного пучка при нахождении вблизи и прохождении критической энергии методом скачка в гармоническом и барьерном ВЧ, что позволило количественно оценить стабильность пучка в различных режимах ускорения;
6. Предложено применение метода фильтров Вина для сохранения направления поляризации в пучках, что расширяет возможности по исследованию электрического дипольного момента и аксионоподобных частиц;

7. Рассмотрены вариации изучения ЭДМ дейтрана и протона в много-периодичных структурах с использованием электростатических дефлекторов или фильтров Вина;

Практическая значимость:

Влияние внутрипучкового рассеяния, а также критической энергии существенно влияет на динамику пучка. Дуальность структуры указывает на возможность её эффективного решения обоих эффектов и использования сразу для двух фундаментально значимых исследований. Во-первых, для изучения кварк-глюонной плазмы в коллайдерных экспериментах с тяжелыми ионами. Во-вторых, для исследования легких поляризованных пучков в симметричных и асимметричных коллайдерных столкновениях. Данных подход, может быть осуществлен в коллайдере NICA с использованием MPD и SPD детекторов.

Исследование динамики пучка вблизи критической энергии показывает необходимость её преодоления, а также способствует определению оптимальных параметров скачка критической энергии, а также его влияние на динамику сгустка.

При искажении дисперсионной функции возникает необходимость её подавления на краях поворотных арок для обеспечения бездисперсионных прямых промежутков. Любое нарушение регулярности приводит к необходимости применения дополнительных усилий по подавлению дисперсии, а также коррекции возникающей нелинейности.

Наличие ЭДМ заряженных частиц может быть установлено только с использованием ускорительных установок в качестве накопительного кольца. Кроме того, реализация условия квази-замороженности спина может быть осуществлена без нарушения основной функции установки. Создание обводных каналов bypass позволит избежать точек встречи, также расположить прямые фильтры Вина независимо от оборудования, используемого для тяжело-ионного эксперимента. В конечном счёте, это позволит использовать NICA в режиме накопительного кольца. Такой подход может быть использован и для Nuclotron, сохраняется функция бустера для поляризованного пучка в коллайдер, а также возможно проведение независимых экспериментов по исследованию ЭДМ как протона, так и дейтрана и поиску аксиона. Такие исследования является

отдельной частью программы спиновой физики, которая формируется на установке NICA-Nuclotron.

Методология и методы исследования. Основными методами исследования являются математическое и компьютерное моделирование, численный эксперимент. Для исследования были использованы программы для расчёта поперечной динамики: MAD-X [27], ОРТИМ [28], BMAD [29], продольной динамики: BLonD [30]; спин-орбитальной динамики: COSY Infinity [31].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Основные свойства дуальной магнитооптической структуры для легких ядер и тяжелых частиц с учетом различия внутрипучкового рассеяния. Время жизни пучка в дуальной структуре с учетом вариации коэффициента проскальзывания в разных арках; [32], [33]
2. Учет влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов в численном моделировании движения в окрестности критической энергии и сравнение с экспериментальными результатами, полученными на У-70; [34], [35]
3. Результаты математического моделирования процесса прохождения ансамбля частиц через критическую энергию с различной скоростью и при различной форме ускоряющего потенциала с учетом ограничений по продольной микроволновой неустойчивости; [36], [37], [38]
4. Резонансная модуляция дисперсионной функции, как метод вариации критической энергии. Результаты оптимизации дисперсионной функции при наличии отсутствующих магнитов (missing magnets); [39], [40]
5. Особенности поляризованных пучков, используемых для исследования электрического дипольного момента в структурах с «квази-замороженным» спином на примере модернизированной структуры Нуклotronа; [41], [42], [43]
6. Метод фильтров Вина для сохранении направления поляризации на основе введения обводных каналов в структуре с квази-замороженным спином для выделения ЭДМ сигнала в поляризованном пучке; [44], [45], [46], [47], [48]

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием аналитических вычислений с результатами численных экспериментов. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены докладывались на российских и международных конференциях, а также рабочих встречах:

- Workshop “Polarized beam in NICA” в 2022 г.;
- Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ-2020. Москва, Россия;
- 63, 65, 66-ая Всероссийская научная конференция МФТИ в 2020, 2023, 2024 гг. г. Долгопрудный, Россия;
- XXVII и XXVIII Всероссийская конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC’21, RuPAC’23. Алушта; Новосибирск, Россия.
- VII, VIII, IX и X Международная конференция Лазерные и Плазменные технологии ЛаПлаз’21, ЛаПлаз’22, ЛаПлаз’23, ЛаПлаз’24, ЛаПлаз’25. Москва, Россия;
- XIII, XIV, XVI международная конференция по ускорителям заряженных частиц IPAC’22 IPAC’23, IPAC’25. Бангкок, Таиланд; Венеция, Италия; Тайпей, Тайвань;
- XIX Международная конференции по спиновой физике высоких энергий DSPIN’23. Дубна, Россия;
- XI-я Международная конференция по ядерной физике в накопительных кольцах STORI’24. Хуэйчжоу, провинция Гуандун, Китай;

Личный вклад. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Содержание диссертации и выносимые на защиту основные положения отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Результаты по подготовке и проведению эксперимента на ускорителе У-70 получены в соавторстве с сотрудниками ИЯИ РАН и ИФВЭ. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно

с соавторами.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в XX печатных изданиях, X из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, X — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 0 приложений. Полный объём диссертации составляет 133 страницы, включая 64 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

В первой главе: особое внимание уделено процессам внутрипучкового рассеяния и наличию критической энергии, влияющие на динамику многозарядных тяжёлых ионов и лёгких ядер. С этой целью рассматривается дуальная магнитооптическая структура, способная адаптироваться для целей обоих типов экспериментов.

В случае тяжелых ионов зарядность выделяет проблему внутрипучкового рассеяния пучка на первый план. Разогрев пучка приводит к росту поперечного эмиттанса и продольного разброса по импульсам. Для предотвращения неконтролируемого роста фазового объёма применяются техники по охлаждению пучка.

Для легких частиц, таких как протоны, соотношение заряда к массе отличается почти в 2 раза по сравнению с тяжелыми ионами, таким образом пропорционально увеличивается и энергия эксперимента. При этом критическая энергия остается неизменной, поскольку является характеристикой конкретной установки и определяется магнитооптикой. Преодоление критической энергии является необходимым для обеспечения стабильности, в первую очередь, продольного движения. Таким образом, для тяжелых ионов такой проблемы не возникает, а в случае легких частиц, требуется принимать меры по преодолению критической энергии. Одним из таких методов может являться создание 'резонансной' структуры.

Во **второй** главе проведён учёт влияния высших порядков разброса по импульсам и моделей продольных импедансов при пересечении критической энергии. Также рассмотрен метод скачка критической энергии для различных ускоряющих потенциалов с целью сохранения стабильности сгустка.

Существенное ограничение на параметры сгустка возникают из-за продольной микроволновой неустойчивости вблизи критической энергии. В конеч-

ном счёте это ограничивает величину светимости коллайдерного эксперимента. Для преодоления критической энергии классически используется процедура скачка критической энергии. Это достигается путем модулирования дисперсионной функции при приближении энергии пучка к значению критической энергии. Данные численного моделирования, также апробированы на экспериментальной установке У-70 в Протвино. Также рассмотрены эффекты влияния высших порядков коэффициента расширения орбиты и простейших моделей импедансов на динамику пучка.

В третьей главе рассматривается метод вариации критической энергии в 'резонансных' магнитооптиках. Для этого может вводится как суперпериодическая модуляция градиентов квадрупольных линз для вариации дисперсионной функции, так и модуляция кривизны орбиты, тем самым изменения коэффициент сжатия орбиты, который напрямую связан с критической энергией ускорителя.

Для 'регулярной' магнитооптической структуры коллайдера NICA рассмотрены варианты модернизации для создания 'резонансной' структуры с поднятой критической энергией. Поскольку установка рассматривалась как стационарная, то это возможно только путем модуляции градиентов в квадрупольных линзах. Для различных полученных структур представлены схемы расстановки секступолей.

В четвёртой главе рассматривается возможность изучения электрического дипольного момента легких заряженных частиц. Исследовано применение концепции квази-замороженного спина для накопительных колец. Рассматривается возможность модернизации колец с сохранением текущего предназначения и расширением исследовательских возможностей установок. Изучена спиновая динамика в кольце с использованием электростатических, а также элементов с совмещенной функцией

Для проведения эксперимента по поиску ЭДМ становится необходимым использовать альтернативный метод управления спином, концепция квази-замороженного спина. В отличие от метода «замороженного» спина, спин больше не сохраняет ориентацию в течение всего периода обращения, а восстанавливает на прямолинейном участке. Это возможно благодаря использованию элементов как с электрическим, так и с магнитным полями, которые называются фильтрами Вина, на прямом участке. Поворот спина в арке на определенный угол компенсируется соответствующим поворотом в фильтре Вина. Поля подбираются таким образом, чтобы создать нулевую силу Лоренца и не нарушить

прямолинейность орбиты. Поляrimетры, расположенные после фильтров Вина, будут обнаруживать ту же ориентацию спин-вектора, и для них она будет 'заморожена'.

В **заключении** приведены результаты работы.

Глава 1. Особенности двойственной магнитооптической структуры для ускорения тяжелых ионов и легких частиц частиц

Независимо от назначения синхротрона, при наличии двух режимов, в которых ускоряются многозарядные тяжёлые частицы и одна или две лёгкие заряженные частицы, возникает задача определения оптимальной конфигурации магнитооптической структуры, которая обеспечит устойчивое движение обоих типов частиц. Многозарядные частицы, в отличие от лёгких, обладают более выраженным эффектом разогрева из-за внутрипучкового рассеяния [49]. А в случае лёгких частиц определяющим фактором является влияние критической энергии на динамику сгустка. Эти эффекты имеют существенное значение для коллайдеров, где светимость играет ключевую роль. При разработке структуры, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к частицам с различным зарядом, принципиально важно создать перестраиваемую структуру без внесения конструктивных изменений. Мы назвали такой подход – проектированием дуальной структуры.

В комплексе NICA дуальная магнитооптическая структура открывает перспективу ускорения как тяжелых ионов, таких как золото, так и легких частиц, таких как протоны и дейтроны. Различное соотношения заряда к массе является существенным при проектировании магнитооптики.

1.1 Выбор критической энергии в магнитооптической структуре с учетом ускорения тяжелых ионов и легких частиц.

В классической регулярной структуре критическая энергия приблизительно равна горизонтальной бетатронной частоте $\gamma_{\text{tr}} \simeq \nu_x$. При одинаковой магнитной жесткости $B\rho$ максимальная энергия для легких частиц выше, чем для тяжелых ионов, из-за их соотношения заряд-масса. Это означает, что структура для тяжелых ионов, оптимизированная для работы до определенной критической энергии, потребует преодоления этой энергии для работы с легкими частицами. По этой причине можно рассмотреть структуру с изменяющейся критической энергией.

1.1.1 Критическая энергия

Поскольку понятия *критическая энергия* (transition energy), *коэффициент уплотнения орбиты* (momentum compaction factor) и *коэффициент проскальзывания* (slip-factor) одни из ключевых и часто упоминаемых в данной работе, поэтому уделим особое внимание при их определении.

Рассмотрим классическое уравнение продольного движения, описывающее эволюцию частицы отклоненной от референсной [8]:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dn} = \eta(\delta) \cdot \frac{T_0 \cdot h \cdot \Delta E}{\beta^2 \cdot E_0} \\ \frac{d(\Delta E)}{dn} = V(\tau) \end{cases} \quad (1.1)$$

где τ , ΔE – временное и энергетическое отклонение рассматриваемой частицы от референсной по энергии, E_0 – энергия референсной частицы, n – номер оборота, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ – угловая частота и соответствующее время обращения частицы, β – относительная скорость, h – гармоническое число, $V(\tau)$ – функция определяющая амплитуду ВЧ для рассматриваемой частицы, η – коэффициент проскальзывания. Индекс 0 имеет значение референсной частицы.

Коэффициент проскальзывания является временным показателем запаздывания или опережения рассматриваемой частицы от референсной. Для его определения сначала рассмотрим зависимость удлинения орбиты от разброса по импульсам

$$C(\delta) = C_0(1 + \alpha_0\delta + \alpha_1\delta^2 + \dots) = C_0(1 + \alpha_0\delta + O(\delta^2)), \quad (1.2)$$

где также вводится понятие важное понятие коэффициента расширения орбиты (momentum compaction factor) [8]:

$$\alpha_c = \frac{1}{C_0} \frac{dC}{d\delta} = \alpha_0 + 2\alpha_1\delta + 3\alpha_2\delta^2 + \dots \equiv \frac{1}{\gamma_{tr}^2}, \quad (1.3)$$

тут γ_{tr} имеет значение Лоренц-фактора при энергии пучка равной критическому значению или просто называется критической энергией. Таким образом, взяв во внимание, что $T = \frac{C}{v} = \frac{C}{\beta c}$, в первом приближении коэффициент проскальзывания может быть определен как

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta C}{C_0} - \frac{\Delta v}{v_0} = \eta\delta. \quad (1.4)$$

Однако, это справедливо только в первом приближении и приводит к выражению

$$\eta = \eta_0 = \alpha_0 - \frac{1}{\gamma_0^2}. \quad (1.5)$$

Отсюда из ур. 1.5 видно, что $\eta_0 \rightarrow 0$ стремится к нулю при приближении $\gamma_0 \rightarrow \gamma_{tr}$ правая часть уравнения ур. 1.1 также стремится к нулю. Возникает необходимость обеспечения стабильности продольного движения при прохождении критической энергии. Поэтому при движении вблизи критической энергии также учитывается и влияние следующих порядков разложения, сравнимых по величине с первым. И определение 1.5 становится неточным. Для наиболее точного определения высших порядков коэффициента проскальзывания может быть использовано следующее соотношение [7].

$$\frac{\Delta T_{n+1}}{T_{n+1}} = \eta_{n+1}\delta_{n+1}, \quad (1.6)$$

тут индекс $n + 1$ отражает $n + 1$ -ое прохождение, а не порядок в разложении. Окончательно для коэффициента проскальзывания в зависимости от высших порядков разложения:

$$\eta(\delta) = \eta_0 + \eta_1\delta + \eta_2\delta^2 + \dots, \quad (1.7)$$

$$\text{где } \eta_1 = \frac{3\beta_0^2}{2\gamma_0^2} + \alpha_1 - \alpha_0\eta_0, \quad \eta_2 = -\frac{\beta_0^2(5\beta_0^2-1)}{2\gamma_0^2} + \alpha_2 - 2\alpha_0\alpha_1 + \frac{\alpha_1}{\gamma_0^2} + \alpha_0^2\eta_0 - \frac{3\beta_0^2\alpha_0}{2\gamma_0^2}.$$

1.1.2 Адаптация структуры для эксперимента с легкими поляризованными частицами

Из-за соотношения заряда к массе, максимальная энергия протонного пучка становится порядка 13 ГэВ. При этом, критическая энергия регулярной структуры, являющаяся характеристикой магнитооптической структуры ускорителя, составляет 5.7 ГэВ. Таким образом, в регулярной структуре возникает необходимость преодоления критической энергии. Классическим способом

является – скачок критической энергии [36], что будет показано в Главе 2. Однако, в этом случае накладываются существенные ограничения на параметры сгустка [38]. Альтернативным способом является повышение критической энергии с использованием резонансной магнитооптической структуры, что будет показано в Главе 3. В этом случае происходит суперпериодическая модуляция дисперсионной функции, путем введения дополнительного семейства фокусирующих квадрупольей.

1.2 Оптимизация времени жизни пучка

Достижение высокой светимости пучка в коллайдерных экспериментах требует обеспечения достаточного времени жизни пучка. Это достигается за счет уменьшения эффектов внутрипучкового рассеяния в сочетании с применением методов стохастического и электронного охлаждения. Данный подход особенно важен при работе с ионными пучками высокой интенсивности. Временная эволюция эмиттанса и разброса импульса в присутствии процессов охлаждения описывается набором уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon}{dt} &= -\underbrace{\frac{1}{\tau_{tr}} \cdot \epsilon}_{\text{cooling}} + \underbrace{\left(\frac{d\epsilon}{dt} \right)_{IBS}}_{\text{heating}} \\ \frac{d\delta^2}{dt} &= -\underbrace{\frac{1}{\tau_{long}} \cdot \delta^2}_{\text{cooling}} + \underbrace{\left(\frac{d\delta^2}{dt} \right)_{IBS}}_{\text{heating}} \end{aligned} \quad (1.8)$$

где ϵ – поперечный эмиттанс, τ_{tr} – поперечное время охлаждения, $\delta = \frac{\Delta p}{p}$ – разброс по импульсам, τ_{long} – продольное время охлаждения. Для независимых от времени, стационарных значений, производные по времени становятся равными нулю, тогда

$$\begin{aligned} \epsilon_{st} &= \tau_{tr} \cdot \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right)_{IBS} \Big|_{\epsilon=\epsilon_{st}} \\ \delta_{st}^2 &= \tau_{long} \cdot \left(\frac{d\delta^2}{dt} \right)_{IBS} \Big|_{\delta^2=\delta_{st}^2} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Критерием применимости того, или иного метода охлаждения может быть сравнение характерных времен стохастического и электронного охлаждения со временем жизни с учетом ВПР во всем предполагаемом диапазоне энергий.

1.2.1 Стохастическое охлаждение

Рассмотрим стохастическое охлаждение, пользуясь приближенной теорией D.Mohl [50; 51]. Следуя его основным выводам, скорость охлаждения определяется выражением

$$\frac{1}{\tau_{tr,1}} = \frac{W}{N} \left[2g \cos \theta \left(1 - 1/M_{pk}^2 \right) - \underbrace{g^2 (M_{kp} + U)}_{\substack{\text{coherent} \\ \text{effect(cooling)}}} \right] - \underbrace{g^2 (M_{kp} + U)}_{\substack{\text{incoherent} \\ \text{effect(heating)}}} \quad (1.10)$$

где $W = f_{max} - f_{min}$ – пропускная способность системы, N – эффективное число частиц, пересчитанное через соотношение орбиты к длине сгустка с учетом его распределения, g – доля наблюдаемой ошибки выборки, скорректированная за оборот, $U = E(x_n^2)/E(x_s^2)$ – отношение шума к сигналу, M_{pk} , M_{kp} – факторы смешивания между пикапом – киккером и киккером – пикапом соответственно. Уравнение 1.10 в отсутствии шума при $g = g_0 = \frac{1-M_{pk}^2}{M_{kp}}$ достигает максимум

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau_{tr}} &= \frac{W}{N} \frac{\left(1 - 1/M_{pk}^2 \right)^2}{M_{kp}} \\ \frac{1}{\tau_l} &= 2 \frac{W}{N} \frac{\left(1 - 1/M_{pk}^2 \right)^2}{M_{kp}} \end{aligned} \quad (1.11)$$

коэффициенты смешивания определяются как

$$\begin{aligned} M_{pk} &= \frac{1}{2(f_{max} + f_{min}) \eta_{pk} T_{pk} \frac{\Delta p}{p}}, \\ M_{kp} &= \frac{1}{2(f_{max} - f_{min}) \eta_{kp} T_{kp} \frac{\Delta p}{p}} \end{aligned} \quad (1.12)$$

где $\eta_{pk} T_{pk} \frac{\Delta p}{p}$, $\eta_{kp} T_{kp} \frac{\Delta p}{p}$ – относительные времена смещения частиц (перемещение), η_{pk} , η_{kp} – коэффициенты проскальзывания, в первом приближении

$\eta_{pk} = \alpha_{pk} - 1/\gamma^2$, $\eta_{kp} = \alpha_{kp} - 1/\gamma^2$, α_{pk} , α_{kp} – локальные факторы расширения орбиты первого порядка, T_{pk} , T_{kp} – абсолютные времена пролета между пикапом-киккером и киккером-пикапом соответственно.

Времена стохастического охлаждения ур. 1.11 зависят от соотношения эффективной плотности частиц N к полосе пропускания системы охлаждения W и свойств магнитооптики, а именно локальных факторов расширения орбиты α_{pk} , α_{kp} . Максимальное значение полосы частот f_{max} ограничено критерием неперекрытия “Schottky”-полос пучка. В простейшем случае это условие может быть записано:

$$f_{max} < \frac{1}{\eta_{pk} T_{pk} \frac{\Delta p}{p}} \quad (1.13)$$

при выполнении которого всегда фактор смещивания $M_{pk} > 1$. В обратном случае, эффективность охлаждения становится нулевой. Таким образом, при заданном числе частиц желательно иметь полосу частот максимально возможной. С точки зрения электроники современные технологии позволяют реализовать полосу частот 10 ГГц [52], однако использование ее не всегда возможно из-за большой величины коэффициента проскальзывания η_{pk} и разброса по импульсам $\frac{\Delta p}{p}$.

Уравнение 1.10 выведено для непрерывного (несгруппированного) пучка. Эффективное число частиц, для случая сгустка, сформированного гармоническим одночастотным ВЧ резонатором, плотность частиц описывается распределением по Гауссу

$$\rho(s) = \frac{N_{bunch}}{\sigma_{bunch} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{s^2}{2\sigma_{bunch}^2}} \quad (1.14)$$

где s – расстояние от центра сгустка, σ_{bunch} – дисперсия распределения частиц и N_{bunch} – число частиц в сгустке. Если принять, что охлаждение определяется его минимальным значением в центре сгустка ($s = 0$), то эффективное значение частиц на орбите длиной C_{orb} равно:

$$N = \int_0^{C_{orb}} \rho_{max} ds = \frac{N_{bunch}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{bunch}} \cdot C_{orb} \quad (1.15)$$

Для сгустка, сформированного мульти-гармонической ВЧ системой барьерного типа («Barrier Bucket»), распределение частиц в сгустке близко к однородному

с длиной сгустка $l_{\text{bunch}} = 4 \cdot \sigma_{\text{bunch}}$. Эффективное значение частиц определяется простым соотношением длины сгустка к общей длине орбиты:

$$N = \frac{N_{\text{bunch}}}{4\sigma_{\text{bunch}}} \cdot C_{\text{orb}} \quad (1.16)$$

Подводя итог, можно сказать, что эффективное значение частиц зависит от распределения и определяется форм-фактором F_{bunch} , лежащим в пределах $F_{\text{bunch}} = \sqrt{2\pi} \div 4$

$$N = N_{\text{bunch}} \cdot \frac{C_{\text{orb}}}{F_{\text{bunch}} \cdot \sigma_{\text{bunch}}} \quad (1.17)$$

Для NICA примем максимальный фактор $F_{\text{bunch}} = 4$, и при ее ориентировочных параметрах $C_{\text{orb}} = 503.04$ м, $\sigma_{\text{bunch}} = 0.6$ м, $N_{\text{bunch}} = 2.2 \cdot 10^9$. С учетом опыта работы FNAL [53] вполне реалистичные значения для полосы частот являются $f_{\max} = 8$ ГГц и $f_{\min} = 2$ ГГц. Для NICA выбрано $f_{\max} = 4$ ГГц и $f_{\min} = 2$ ГГц. При таких параметрах максимальная достижимая скорость охлаждения $\frac{1}{\tau_{\text{tr}}} = \frac{1}{230}$ с⁻¹.

Исходя из уравнений 1.12, видно, что может происходить асимптотический рост в двух случаях:

1. при приближении коэффициента проскальзывания к значению $\eta \rightarrow \frac{1}{2(f_{\max}+f_{\min})T_{\text{pk}} \frac{\Delta p}{p}}$, Schottky-спектр пучка становится сплошным и $M_{\text{pk}} \rightarrow 1$;
2. при приближении коэффициента проскальзывания к нулю, перемещение на пути от киккера к пикапу не происходит и $M_{\text{kp}} \rightarrow \infty$.

Эффективность стохастического охлаждения зависит от свойств магнитооптики. В классических, регулярных, структурах критическая энергия пропорциональная горизонтальной частоте бетатронных колебаний $\gamma_{\text{tr}} \approx \nu_x$ и коэффициент проскальзывания $\eta = 1/\gamma_{\text{tr}}^2 - 1/\gamma^2$ может достигать нуля. Чтобы избежать асимптотического роста, необходимо изменять коэффициент проскальзывания, что означает вариацию γ_{tr} . Это возможно в 'резонансной' структуре, где критическая энергия может быть увеличена или даже достигать комплексного значения [14]. В более экзотическом случае может быть использована "комбинированная" структура, где η_{pk} (пикап-киккер) с реальной критической энергией на одной арке

$$\eta_{\text{pk}} = \frac{1}{\gamma_{\text{tr}}^2} - \frac{1}{\gamma^2} \quad (1.18)$$

компенсируется η_{kp} (киккер-пикап) с комплексным значением в другой арке соответственно

$$\eta_{kp} = -\frac{1}{\gamma_{tr}^2} - \frac{1}{\gamma^2} \quad (1.19)$$

для всего кольца. При такой конструкции достигается требуемое соотношение факторов смешивания для максимальной скорости охлаждения, близкой к идеальной [54]. Рассмотрим заявленные структуры более подробно.

Поведение β -функций и D дисперсии вдоль всей регулярной структуры с $\gamma_{tr} = 7$ показаны на рисунке 1.1. Прямые участки, которые остаются неизменными во всех структурах, необходимы для анализа резонансных характеристик всего кольца в целом. Их расположение не влияет на внутрипучковое рассеяние и критическую энергию. Для подавления дисперсии в регулярной структуре с обеих сторон арки реализуется технология ‘отсутствующих магнитов’ (‘missing magnet’).

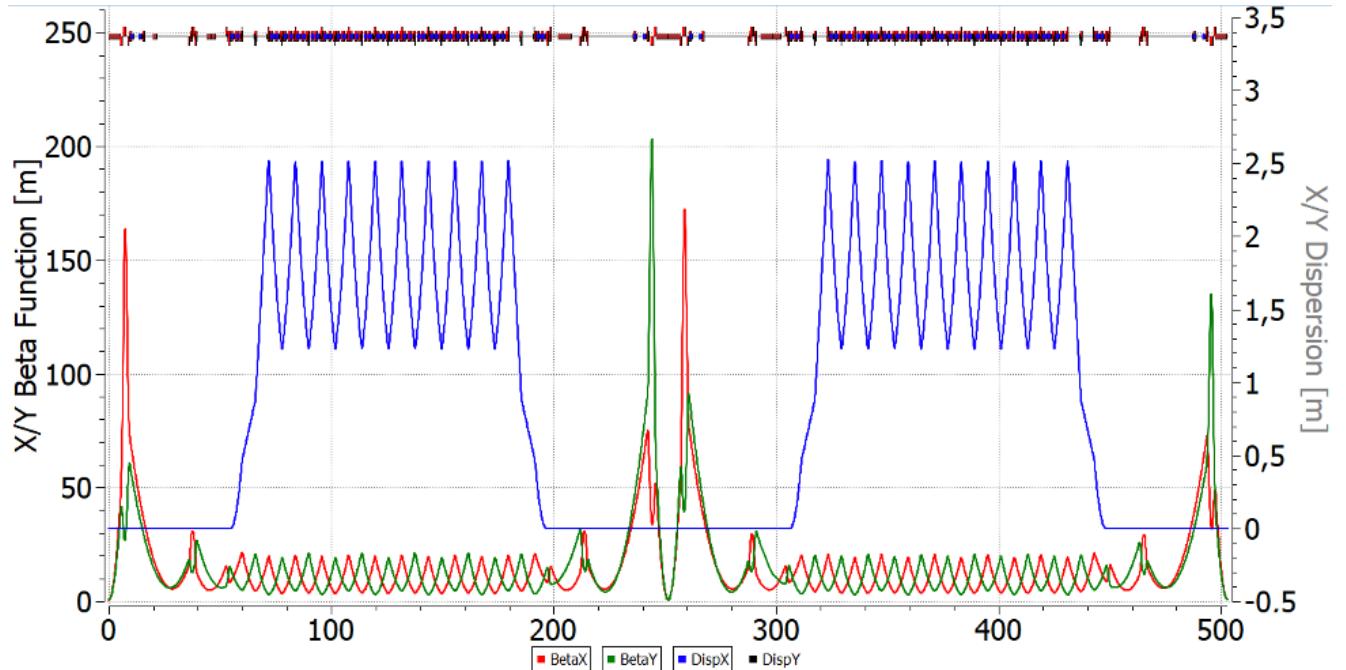


Рисунок 1.1 — Регулярная ФОДО структура.

Резонансная структура основана на принципе резонансной модуляции дисперсионной функции [15] и может быть получена из регулярной структуры путем разделения фокусирующих квадрупольей на 2 семейства с различными градиентами, что будет подробно рассмотрено в Главе 3. Таким образом, критическая энергия может быть скорректирована и увеличена по сравнению с энергией эксперимента, избегая проблем с пересечением критической энергии. Для подавления дисперсии можно использовать либо два краевых фокусирующих

квадруполя с обоих сторон поворотной арки, либо только два семейства фокусирующих квадрупольей на арке [39], когда достигается целое число бетатронных колебаний (рис. 1.2).

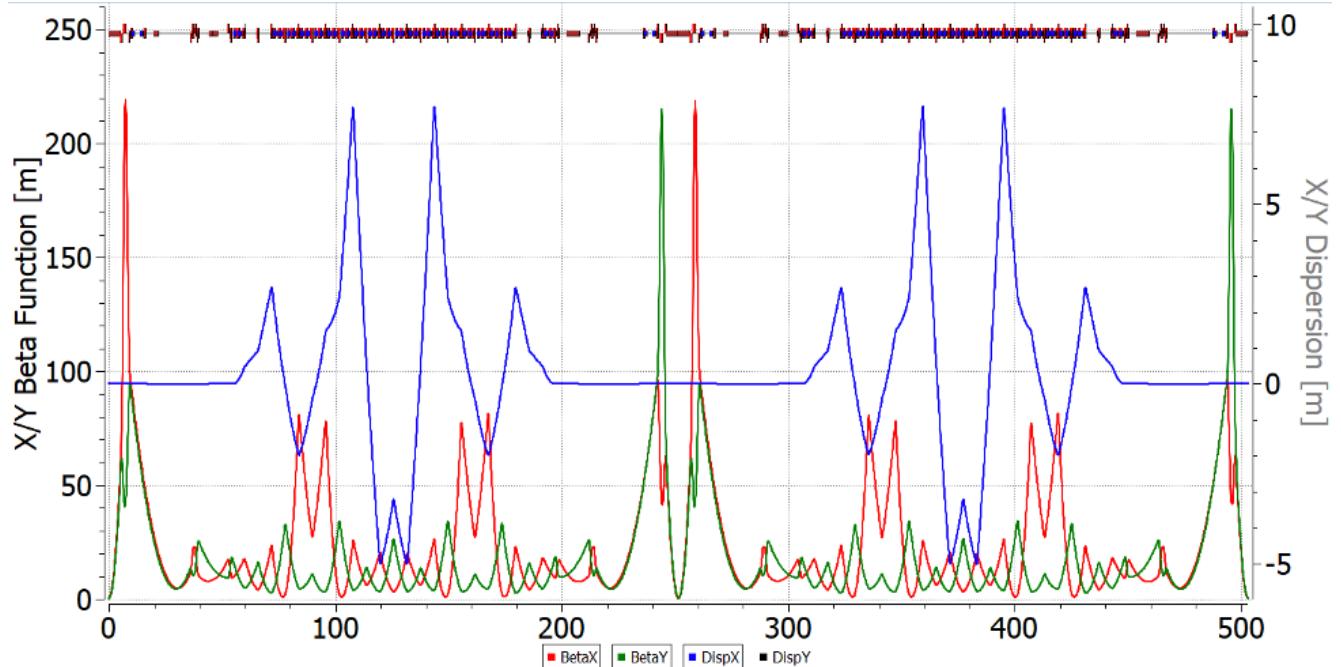


Рисунок 1.2 — Резонансная магнитооптическая структура с повышенной критической энергией.

В случае комбинированной структуры, одна арка функционирует в регулярном режиме, в то время как другая использует резонансную модуляцию (рис. 1.3). Такой выбор основан на принципе компенсации, описанном уравнениями 1.18 и 1.19, который требует большей глубины модуляции квадрупольей, чем в чисто резонансной структуре с повышенной критической энергией.

Как показано на рисунке 1.4 для резонансной магнитооптике с увеличенной критической энергией, вторая асимптотика соответствует более высокой энергии по сравнению с регулярной структурой. В комбинированной магнитооптике эффективность охлаждения близка к идеальному значению в широком диапазоне энергий от 2.5 до 4.5 ГэВ/нуклон, в то время как в регулярной оптике скорость охлаждения почти в два раза ниже в наиболее оптимальной точке ~ 3 ГэВ/нуклон. Такое поведение объясняется отсутствием второй точки асимптотического роста.

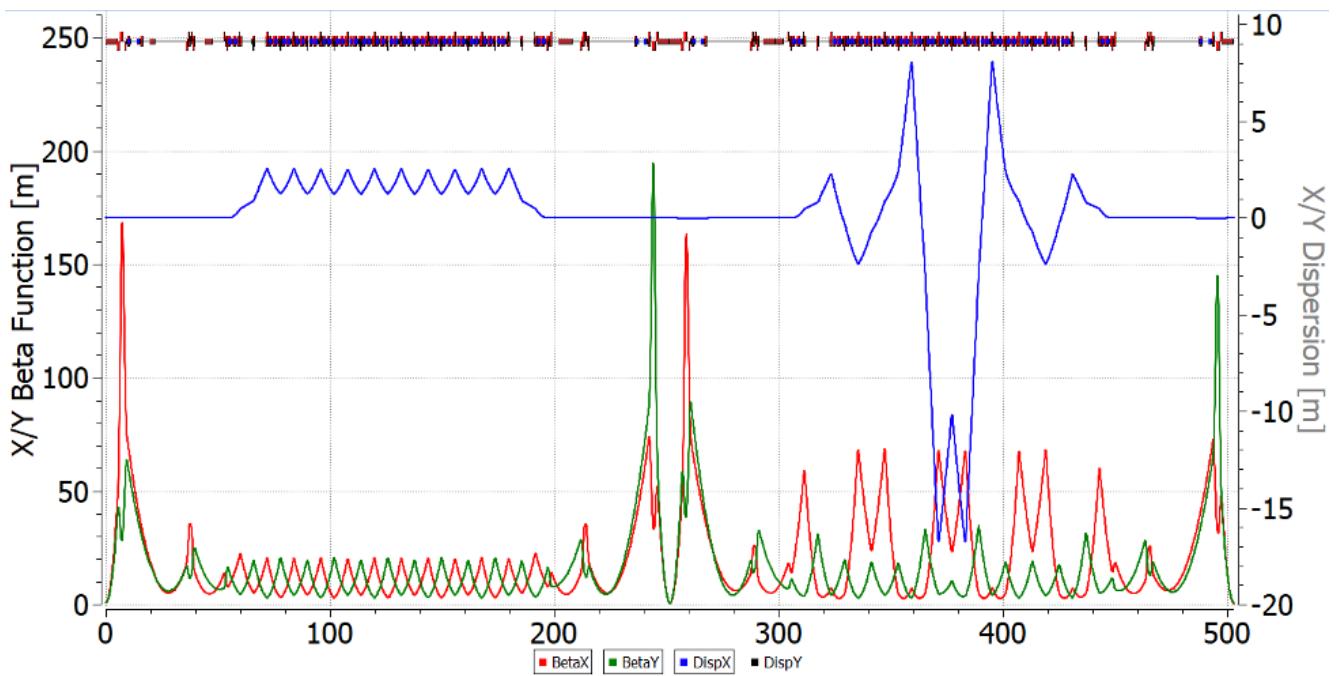


Рисунок 1.3 — Резонансная магнитооптическая структура с реальной и комплексной критической энергией в арках.

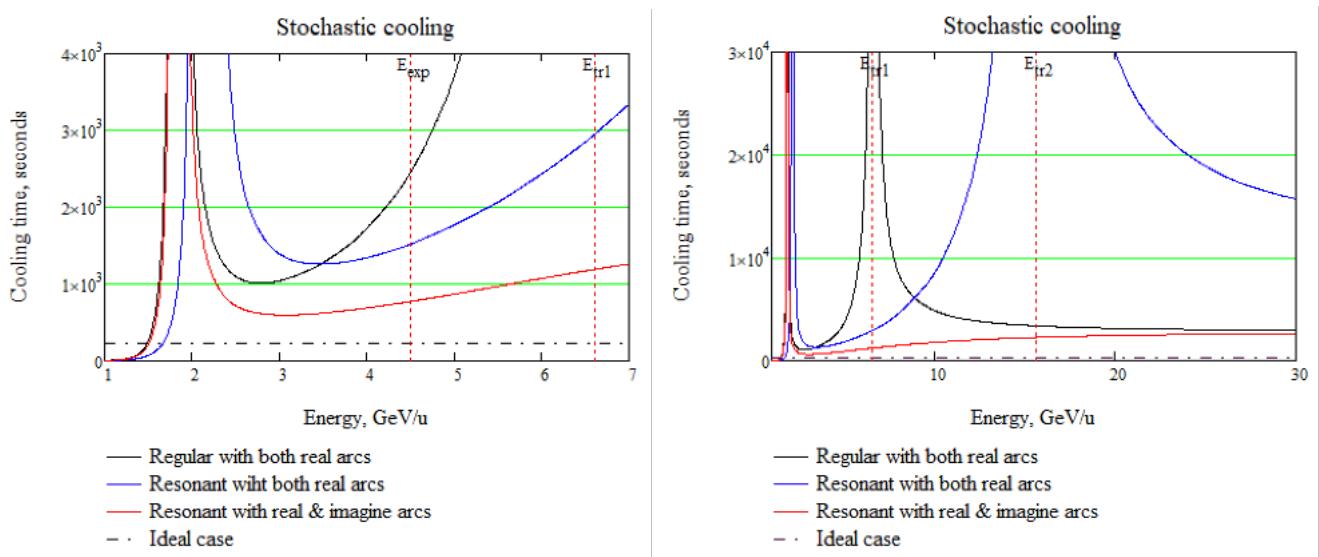


Рисунок 1.4 — Зависимость времени стохастического охлаждения от энергии для разных структур.

1.2.2 Внутрипучковое рассеяние в регулярной, резонансной и комбинированной структурах

Как было уже сказано, внутрипучковое рассеяние является основным фактором, ограничивающим время жизни пучка в коллайдере. Поэтому критерием для использования того или иного способа охлаждения является сравнение их

характерных времен с временем разогрева пучка из-за внутрипучкового рассеяния. Из общей теории этого явления следует:

$$\frac{1}{\tau_{IBS}} = \frac{\sqrt{\pi} c Z^2 r_p^2 L_C}{4 A} \cdot \frac{N}{C_{orb}} \cdot \frac{\langle \beta_x \rangle}{\beta^3 \gamma^3 \varepsilon_x^{5/2} \langle \sqrt{\beta_x} \rangle} \left(\left\langle \frac{D_x^2 + \dot{D}_x^2}{\beta_x^2} \right\rangle - \frac{1}{\gamma^2} \right). \quad (1.20)$$

В отличие от стохастического охлаждения скорость разогрева из-за внутрипучкового рассеяния растет с уменьшением энергии как $1/\gamma^3$. Кроме того, выражение, стоящее в круглых скобках, пропорционально коэффициенту проскальзывания η . Поэтому следует ожидать, что в оптике со значением η близким к нулю скорость разогрева должна падать. На рисунке 1.5 показаны зависимости постоянной времени нагрева в трех вышеупомянутых структурах, посчитанных с помощью программы MADX [27; 55] для параметров тяжелоионного пучка $^{197}_{79}\text{Au}$ коллайдера NICA с максимальной светимостью $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, интенсивностью $N_{heavy} = 2.2 \times 10^9 \text{ ppb}$ (particles per bunch – количество частиц в пучке) и количеством пучков $n_{bunch} = 22$. В случае легких ядер, таких как протоны и дейтроны, время ВПР значительно увеличивается по мере уменьшения заряда даже для интенсивного сгустка $10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $N_{light} = 1 \times 10^{12} \text{ ppb}$. В таблице 1 приведены расчёты, которые показывают, что при энергии эксперимента времена ВПР различаются примерно в 10 раз, поэтому проблема внутрипучкового рассеяния имеет значение для тяжелоионного сгустка с высокой зарядностью.

Из сравнения времени внутрипучкового рассеяния со временем охлаждения можно сделать заключение, что в регулярной структуре стохастическое охлаждение способно сбалансировать внутрипучковое рассеяние в диапазоне энергий $W \geq 4.5 \text{ ГэВ/нуклон}$. Для применения стохастического охлаждения во всем диапазоне энергий очевидно, что мы должны пожертвовать светимостью пучка на низких энергиях посредством увеличения эмиттанса. В резонансных структурах, время ВПР значительно меньше. Это объясняется тем, что структура имеет большее соотношение между дисперсией и β -функцией пучка $\left\langle \frac{D_x^2 + \dot{D}_x^2}{\beta_x^2} \right\rangle$, чем в случае регулярной. Таким образом, для тяжелоионной опции должна быть использована структура с максимально регулярным β -функцией и D дисперсией – то есть минимально модулированы. Для охлаждения пучка до 4.5 ГэВ/нуклон в регулярной структуре также используется электронное охлаждение [56].

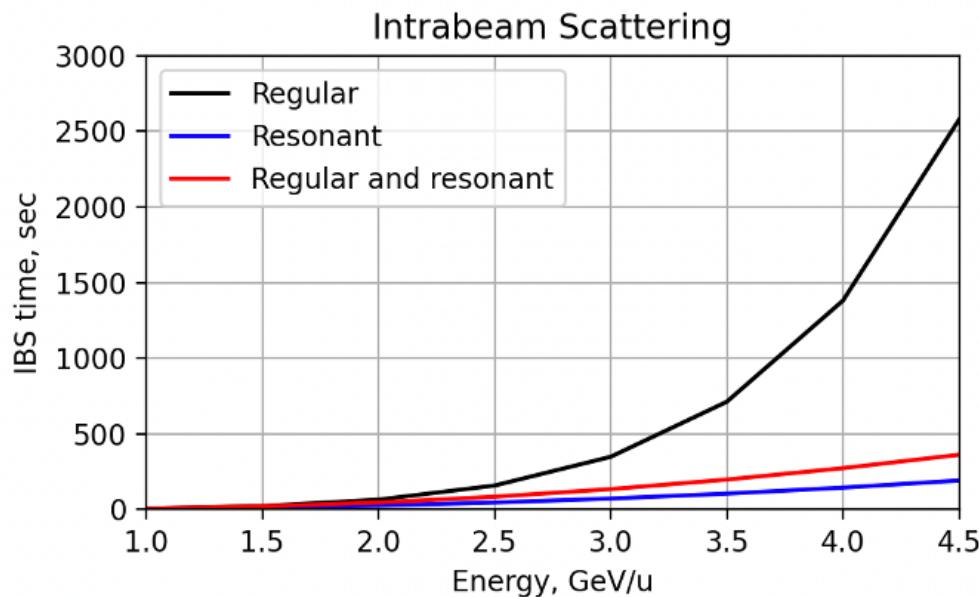


Рисунок 1.5 — Зависимость постоянной времени разогрева пучка из-за внутрипучкового рассеяния в регулярной, «резонансной» и комбинированной структурах от энергии пучка.

Структура	Регулярная	Резонансная	Комбинир.
Энергия, ГэВ на нуклон	4.5	12.6	12.6
Переходная энергия γ_{tr}	7	15	150
Глубина модуляции	—	25%	45%
Время охл. при 4.5 ГэВ/н, с	2500	1500	800
Время ВПР, с (для тяжелых ионов при 4.5 ГэВ/н)	2500	400	250
Время ВПР, с (для протонов при 12.6 ГэВ/н)	1.8×10^4	4.5×10^3	7.9×10^3
Частоты	9.44/9.44	9.44/9.44	9.44/9.44

Таблица 1 — Основные параметры магнитооптических структур.

Выводы

Рассмотрены основные принципы реализации дуальной магнитооптическая структуры. В таблице 1 приведены основные параметры рассмотренных структур.

- Для легких частиц из-за соотношения заряда к массе энергия эксперимента может превышать критическую энергию установки, которая является оптимальной для тяжелых ионов. При использовании дис-

- персионной модуляции критическая энергия увеличивается или даже достигает комплексного значения в резонансной или комбинированной магнитооптической структуре;
2. Показано, что вследствие модуляции β -функции и $D(s)$ дисперсии уменьшается время внутрипучкового рассеяния, что имеет решающее значение для многозарядных тяжелых частиц. По этой причине регулярная магнитооптическая структура с минимально модулированной $D(s)$ дисперсией и β -функцией оптимальна в режиме работы с тяжелыми ионами. Несмотря на то, что стохастическое охлаждение в регулярной структуре значительно слабее, чем в резонансной и комбинированной, оно может компенсировать эффект от внутрипучкового рассеяния;
 3. Дуальная магнитооптическая структура предлагается для ускорения пучков как тяжелых ионов, так и легких частиц, что показано на примере установки NICA. Для преобразования регулярной структуры, оптимизированной для ускорения тяжелых ионов с точки зрения времени жизни пучка, в резонансную, с варьируемой критической энергией для легких частиц, не требуется никаких особых изменений, достаточно лишь внести отдельное семейство квадрупольей.

Глава 2. Прохождение критической энергии в регулярной магнитооптической структуре синхротрона

Данная глава посвящена рассмотрению влияния критической энергии на продольную динамику, а также процедуры скачка критической энергии в регулярной структуре синхротрона. Учтены высшие порядки, а также рассмотрены модели импеданса для разных интенсивностей.

Исходя из изложенных уравнений продольного движения в Главе 1, приближение энергии пучка к критическому значению ведет к изохронному движению, при котором частота синхротронных колебаний стремится к нулю и означает отсутствие продольного перемешивания частиц в сепараторе. При этом нарушается адиабатичность движения а также проявляется влияние высших порядков зависимости от разброса по импульсу – нелинейность. При этом затухание Ландау оказывается неспособно подавить возникающие возмущения в интенсивных сгустках, а наличие пространственного заряда и других импедансов оказывает влияние на развитие продольной микроволновой неустойчивости, нестабильности отрицательной массы и поперечной голова-хвост (head-tail) [7], [57] и в конечном счёте теряется фазовая стабильность.

Увеличение скорости прохождения критической энергии уменьшает влияние факторов, возмущающих фазовое движение. Широко используется метод скачка критической энергии, который применяется на многих установках CERN [9], BNL [58], в том числе был реализован в России на синхротроне У-70 [59]. Сдвиг критической энергии обеспечивается искажением дисперсионной функции. Для этого могут быть использованы разные методы – изменение частоты бетатронных колебаний в регулярной структуре, применение дополнительных квадрупольей с обратной полярностью, расположенных через один период друг от друга. Указанные методы для каждой отдельной установки рассматривается отдельно и устанавливают ограничения в зависимости от потребностей конечного эксперимента.

Прохождение критической энергии является актуальной задачей для протонного пучка в строящемся комплексе NICA (ОИЯИ г. Дубна). С целью изучения данной проблемы, исследована динамика продольного движения в окрестности критической энергии У-70 (НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ г. Протвино). Промоделирована процедура скачка критической энергией в

синхротроне У-70 при помощи численного моделирования. Полученные данные также апробированы на ускорительном сеансе [34].

Важным фактором, описывающим взаимодействие пучка и элементов ускорителя является влияние различного рода импедансов, а также типа высокочастотных резонаторов (ВЧ) на продольную динамику во время процедуры преодоления критической энергии. Отличительной особенностью является использование ВЧ барьера типа, в результате чего достигается специфическое распределение пучка в фазовом пространстве, отличное от классического, формируемого гармоническим ВЧ [60].

Результаты данного исследования помогут осветить потенциальные последствия прохождения критической энергии и определить существенные параметры, влияющие на динамику фазового движения.

2.1 Построение регулярной структуры на основе ячеек ФОДО, ФДО, ОДФДО

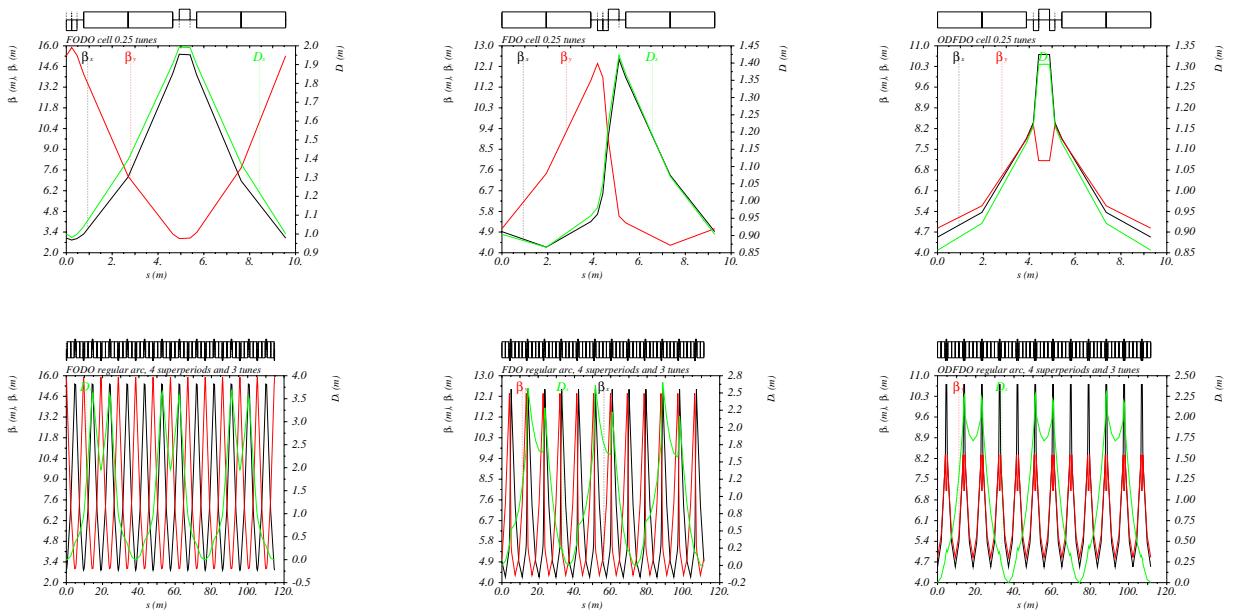


Рисунок 2.1 — Твисс-параметры $\beta_{x,y}$, D_x . Сверху – для ячеек для сигнлетной ФОДО, дублетной ФДО, триплетной ОДФДО ячеек; посередине – регулярная структура; снизу – резонансная.

На основе ФОДО, ФДО и ОДФДО ячеек могут быть сконструированы регулярные поворотные арки как показано на рис. 2.1. Для ФОДО ячейки характерно максимальное пространственное разделение минимумов и максимумов бета-функций. Однако, максимальное значение бета-функции и дисперсионной функции наибольшее для ФОДО структуры. Также стоит отметить, что растет градиент в квадрупольных линзах для достижения одинакового набега фазы, в следующем порядке: ФОДО, ФДО, ОДФДО.

2.1.1 Подавление дисперсии в регулярных арках с missing magnet и/или квадруполями с варьируемыми градиентами

Дисперсионная функция $D(s)$ является решением неоднородного уравнения поперечного движения. И является показателем зависимости смещения замкнутой орбиты для вне осевых частиц с ненулевым разбросом по импульсу δ [8].

Необходимость наличия бездисперсионных областей встречается в ряде задач в ускорительной технике. Для коллайдерных экспериментов, пучки сталкивается в определенной заданной точке (Interaction Point - IP) и для достижения большой светимости требуется в точке встречи иметь минимальный поперечный размер пучка, который пропорционален дисперсионной функции. Кроме того, при инжекции из бустера (buster) в основное кольцо (main ring), необходимо согласование Твист-функций для сохранения пучка. Такое условие может легко достигаться в случае нулевой дисперсии. В обратном случае, необходимо нарочно возбуждать орбиту для их согласования. Также, установка определенных элементов, таких как высокочастотные резонаторы, в места нулевой дисперсии минимизирует эффект синхро-бетатронных резонансов связи.

Наиболее простым способом дисперсия в поворотной арке может быть подавлена в периодической структуре, где частота кратна целому числу 2π , при таком подходе создаётся ахромат первого порядка. Другим известным, уже ставшим классическим, является подход с введением техники 'отсутствующих' магнитов ('missing magnet') [61]. В этом случае, не реализуются условия ахромата первого порядка. Так, в коллайдере NICA реализована техника отсут-

ствующих магнитов и инжекция происходит в место с ненулевой дисперсией, что обусловлено особенностью расположения оборудования.

Особо стоит отметить, что в случае спиновой динамики, на прямом участке необходимо использование прямых фильтров Вина, что будет показано в Главе 4. Такое устройство не возмущает орбиту так как изначально планируется сделать нулевую силу Лоренца (или одинаковую кривизну полей E и B полей). Однако, при этом искажается дисперсионная функция, что должно быть дополнительно компенсировано.

2.2 Прохождение критической энергии

2.2.1 Численное моделирование динамики продольного движения

Основные уравнения, которые будут проанализированы – уравнения продольного фазового движения. Наиболее классически уравнения 1.1 могут быть записаны в зависимости от времени:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \eta(\delta) \cdot \frac{h \cdot \Delta E}{\beta^2 \cdot E_0} \\ \frac{d(\Delta E)}{dt} = \frac{V(\tau)}{T_0} \end{cases} \quad (2.1)$$

Для моделирования приведенной системы уравнений используются различные программы. Наиболее современной является BLoD , CERN [30]. Для пересчёта временной задержки могут быть использованы 2 различные схемы, как 'простая', учитывающая только первый порядок разложения η :

$$\Delta t^{n+1} = \Delta t^n + \frac{\eta_0^{n+1} T_0^{n+1}}{(\beta_s^{n+1})^2 E_s^{n+1}} \Delta E^{n+1}, \quad (2.2)$$

так и 'точная', учитывающая зависимость от высших порядков разложения:

$$\begin{aligned} \Delta t^{n+1} &= \Delta t^n + T_0^{n+1} \times \\ &\times \left[\left(1 + \alpha_0^{n+1} \delta^{n+1} + \alpha_1^{n+1} (\delta^{n+1})^2 + \alpha_2^{n+1} (\delta^{n+1})^3 \right) \left(\frac{1 + \frac{\Delta E^{n+1}}{E_s^{n+1}}}{1 + \delta^{n+1}} \right) - 1 \right]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для пересчёта приращения энергии используется уравнение, включающее учёт только гармонических ВЧ, а также разности энергии n и $n + 1$ оборота:

$$\Delta E^{n+1} = \Delta E^n + \sum_{k=0}^{n_{\text{rf}-1}-1} V_k^n \sin \varphi_{\text{rf},k} (\Delta t^n) - (E_s^{n+1} - E_s^n) \quad (2.4)$$

Такой подход создаёт сложности при необходимости моделирования в BLonD барьера ВЧ, тогда необходимо представить в виде набора ВЧ станции с различными частотами, соответствующим Фурье-разложению сигнала потенциального барьера, что будет проделано в дальнейшем.

2.2.2 Стабильность продольного фазового движения вблизи критической энергии

Уравнения 2.1 определяют продольные колебания с определенной частотой. Вдали от критической энергии частота синхротронных колебаний слабо меняется со временем, движение адиабатично. Вблизи критической энергии нарушается условие адиабатичности синхротронного движения. Характерное время адиабатичности можно оценить, сравнивая синхротронную частоту с темпом изменения удерживающей сепаратрисы, что показано на рис. 2.2а [7]:

$$\tau_{\text{ad}} = \left(\frac{\pi \beta^2 m c^2 \gamma_{\text{tr}}^4}{\dot{\gamma} \omega_0^2 h e V |\cos \varphi_s|} \right)^{1/3} \quad (2.5)$$

где γ_{tr} – Лоренц-фактор, соответствующий критической энергии, $\dot{\gamma}$ – темп изменения энергии. При адиабатичном движении как сепаратриса, так и частота колебаний медленно меняется со временем.

Нелинейность продольного движения проявляется, когда $\eta_1 \hat{\delta}$ сравнимо с η_0 , характерное время (рис. 2.2б):

$$\tau_{\text{nl}} = \frac{\eta_1 \hat{\delta}}{2 \dot{\gamma} / \gamma_{\text{tr}}^3} = \gamma_{\text{tr}} \frac{3/2 \beta^2 + \gamma_{\text{tr}}^2 \alpha_1}{2 \dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

где $\hat{\delta} \approx 10^{-2} - 10^{-3}$ – абсолютное значение максимального отклонения импульса вблизи критической энергии, α_1 – второй порядок коэффициента уплотнения орбиты. Для регулярной ФОДО структуры У-70 с скомпенсированной натуральной хроматичностью, получено $\alpha_1 \simeq 0.01$ [34].

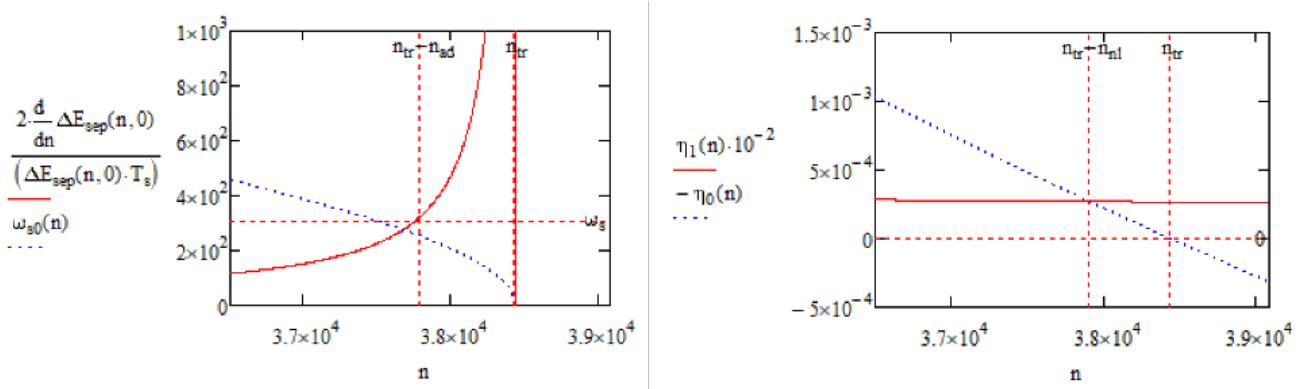


Рисунок 2.2 — а) Классическая синхротронная частота и темп изменения огибающей сепаратрисы в окрестности критической энергии от номера оборота; б) изменение первого и второго порядка коэффициента проскальзывания η_0 , $\eta_1\delta$ в окрестности критической энергии от номера оборота.

Кроме того, из ур. 2.1 следует условие стабильности синхротронных колебаний

$$\eta_0 \cos \varphi_s < 0 \quad (2.7)$$

Видно, что для продольного согласования при прохождении критической энергии также должна быть сдвинута фаза φ_s ускоряющего поля ВЧ на $\pi - 2\varphi_s$.

Оценки для У-70, приведенные в таблице 2, отражают тот факт, что время адиабатичности 2.5 может быть сравнимо со временем нелинейности 2.6 $\tau_{ad} \sim \tau_{nl}$. При приближении энергии к критической, продольная длина пучка уменьшается, а разброс по импульсам увеличивается. На рис. 2.3 приведены результаты моделирования прохождения критической энергии при ускорении от 7.0 до 13.0 ГэВ для $\eta = \eta_0$ и $\eta = \eta_0 + \eta_1\delta$ в различных моделях BLonD. Влияние второго порядка коэффициента проскальзывания увеличивает продольный эмиттанс, что может быть критично и приводит к необходимости применения дополнительных мер по сохранению фазового объема.

2.2.3 Влияние индуктивного импеданса

На продольную динамику также оказывает влияние элементы ускорителя. Для описания электромагнитного взаимодействия пучка с элементами структуры ускорителя вводится понятие импеданса [62]. И обычно может являться

Полная длина L , м	1483.699
Коэффициент расширения орбиты α_0	0.011120
Коэффициент расширения орбиты α_1	0.01
Критическая энергия, ГэВ	7.957
Лоренц-фактор γ_{tr}	7.48
Максимальная интенсивность в сеансе, ррр	$4 \cdot 10^{12}$
Ускоряющая фаза $\sin(\varphi_s)$	$1/2$
Время адиабатичности τ_{ad} , мс	3.218
Время нелинейности τ_{nl} , мс	2.646
Гармоническое число	30
Амплитуда ускоряющих станций, кВ	10
Количество ускоряющих станций	40
Темп ускорения $\dot{\gamma}$, с^{-1}	42.7

Таблица 2 — Основные параметры кольца и ВЧ для У-70

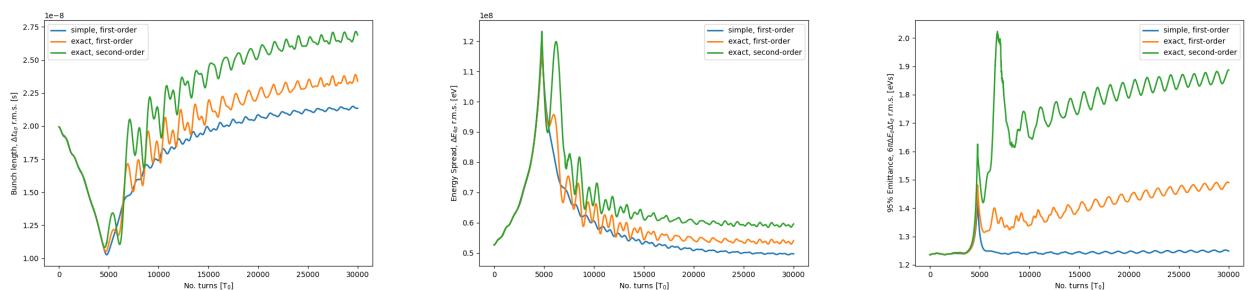


Рисунок 2.3 — Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 7 до 13 ГэВ для трёх моделей без скачка и учёта импеданса. Синяя – учёт только первого порядка $\eta = \eta_0$, ‘simple’ solver, оранжевая – $\eta = \eta_0$, ‘exact’ solver, зеленая – $\eta = \eta_0 + \eta_1 \delta$, ‘exact’ solver.

достаточно сложной функцией, содержащей как мнимую, так и действительную часть. Вид импеданса может быть определен как аналитически, взяв во внимание все наиболее значимые элементы, так и экспериментально, на уже действующей установке. Поскольку оба эти подхода являются достаточно комплексными и сложными, в качестве первого приближения могут быть использованы более простые модели импедансов.

Особенно важным для изучения продольной динамики при прохождении критической энергии является продольный импеданс $Z_{\parallel}(\omega)$. В данной работе ограничимся исследованием динамики с учётом его мнимой индуктивной компонентой $Z_n/n = \pm i \cdot const$. Положительная индуктивность может соответствовать продольному импедансу связи пикап-электродов, кикер-магнитов и сильфонов [59]. Отрицательная индуктивность соответствует импедансу гладкой камеры при наличии пространственного заряда и описывается аналитически:

$$\frac{Z_{SC}}{n} = -\frac{Z_0}{2\beta\gamma^2} \left[1 + 2 \ln \left(\frac{b}{a} \right) \right]. \quad (2.8)$$

Для наглядности, приведём напряжение, индуцированное пространственным зарядом, $V_{SC}(\varphi)$. Уравнение определяется производной от функции распределения $f(\varphi)$ в пространстве [63]:

$$V_{SC}(\varphi) = \frac{Z^2 h^2 g_0 Z_0 c e}{2 R_0 \gamma^2} \cdot \frac{\partial (N_0 \cdot f(\varphi))}{\partial \varphi}. \quad (2.9)$$

На сеансе для У-70 наблюдалась интенсивность в импульсе порядка $N_{tot} = 4 \cdot 10^{12}$ ppp (particles per period), соответственно, в сгустке – порядка $N_{beam} = 4 \cdot 10^{11}$ ppb (particles per beam). Моделирование продольной динамики при изменении энергии от 7 до 9 ГэВ показывает, что при малой интенсивности $N_{beam} = 4 \cdot 10^{11}$ ppb как для отрицательного, так и для положительного значений рассматриваемого импеданса пучок сохраняет стабильность. Для больших интенсивностей $N_{beam} = 1 \cdot 10^{12}$ ppb наблюдается существенное изменение симметрии фазового объёма и увеличение продольного эмиттанса (рис. 2.4, таблица 3). В соответствии с экспериментальными данными начальное значение длины сгустка $\tau_L = 4t_\sigma \simeq 20$ нс для $E_0 = 7$ ГэВ. Для гауссова распределения $\Delta E_0 = 4E\sigma = 52.7$ МэВ, $\epsilon_{095\%} = 1.23$ эВ·с.

Параметры моделирования	95% фазовый объем	Сохранение пучка	Особенности
$\alpha_1 = 0$, simple, Без импеданса	1.23	100%	Простая модель, рост эмиттанса отсутствует
$\alpha_1 = 0$, exact, Без импеданса	1.4	99.65%	Точная модель, нелинейность отсутствует, влияние неадиабатичности, рост эмиттанса
$\alpha_1 = 0.01$, exact, Без импеданса	1.8	99.65%	Влияние нелинейности, рост эмиттанса в ~ 1.5 раза
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = -i \cdot 10$, $4 \cdot 10^{11} \text{ ppb}$	1.8	99.65%	Уменьшение длины сгустка после γ_{tr} , фокусирование после γ_{tr} , рост эмиттанса
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = +i \cdot 10$, $4 \cdot 10^{11} \text{ ppb}$	1.9	99.60%	Уменьшение длины сгустка до γ_{tr} , раскачивание после γ_{tr} , рост эмиттанса
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = -i \cdot 10$, $1 \cdot 10^{12} \text{ ppb}$	2.3	99.60%	Существенное сжатие длины сгустка до γ_{tr} , рост эмиттанса
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = +i \cdot 10$, $1 \cdot 10^{12} \text{ ppb}$	4.1	98.60%	Увеличенная амплитуда квадрупольных колебаний, существенный рост эмиттанса

Таблица 3 — Результаты численного моделирования прохождения критической энергии, в том числе с учётом влияния различных импедансов для различных интенсивностей.

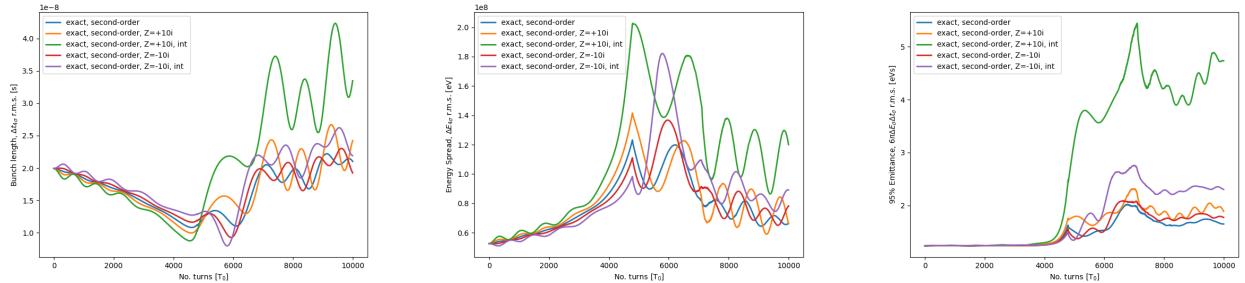


Рисунок 2.4 — Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 7 до 9 ГэВ без скачка, с учётом различного вида импеданса и интенсивностей.

2.2.4 Процедура скачка критической энергии

Для сохранения стабильности продольного движения, продольный эмиттанс не должен расти при прохождении критической энергии. Для этого используется метод скачка критической энергии при приближении энергии пучка к критической энергии [9]. Такой подход заключается в быстром изменении параметров ускорителя, при котором изменяется α пропорциональная γ_{tr} (ур. 1.3). В общем случае, коэффициент расширения орбиты определяется как интеграл:

$$\alpha = \frac{1}{C} \int_0^C \frac{D(s)}{\rho(s)} ds \quad (2.10)$$

где s — переменная длины ускорителя, $D(s)$ — дисперсионная функция, $\rho(s)$ — кривизна орбиты. Изменение коэффициента расширения орбиты в стационарной установке возможно при модулировании дисперсионной функции, так как $\rho(s)$ остается неизменной.

Таким образом, возрастает скорость прохождения критической энергии, при этом сам темп ускорения не меняется. Параметры скачка могут быть определены при рассмотрении магнитооптической структуры и возможностью изменения тока в вспомогательных квадрупольных линзах, либо в квадруполях, расположенных в поворотных арках. Особенности обоих подходов будут рассмотрены далее на примере скачка критической энергии в синхротроне У-70, а также синхротрона NICA.

2.3 Особенности процедуры скачка критической энергии в синхротроне У-70

Модуляция дисперсионной функции в синхротроне У-70 осуществляется вспомогательными квадрупольями во 2-ом и 8-ом блоках каждого суперпериода [64]. На рис. 2.5 изображены параметры Твисса для одного суперпериода, состоящего из 10 магнитных блоков с совмешённой функцией как для полностью регулярной структуры У-70, так и структуры с искаженной дисперсионной функцией.

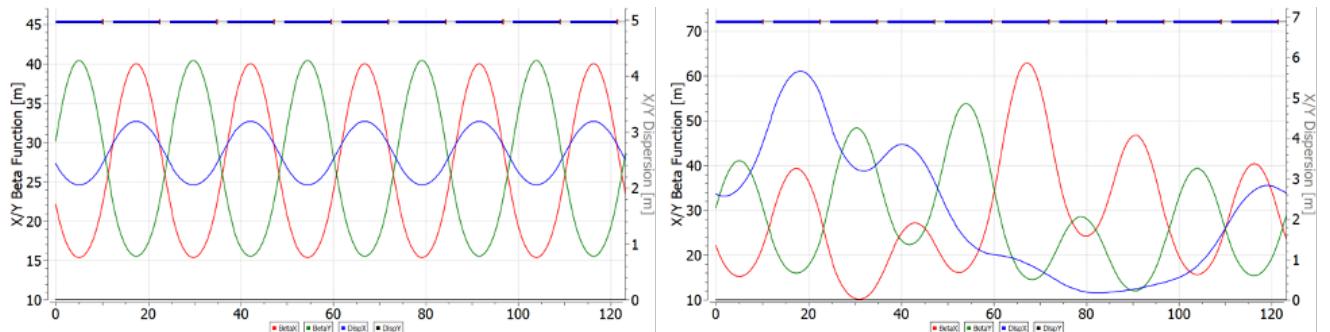


Рисунок 2.5 — Твисс-параметры β_x, β_y, D_x для суперпериода У-70 а) регулярная структура; б) структура с модулированной дисперсией.

Вспомогательные квадруполи расположены через полпериода $\Delta v_{x,y} = 0.5 \times 0.5$ и имеют противоположные полярности. При такой модуляции дисперсии не происходит сдвига рабочей точки, поскольку действие одного квадруполя, подавляется другим в силу указанного набега фазы. В таблице 4 приведены значения рабочей точки в ходе процедуры поднятия критической энергии и скачка. Таким образом, рассматриваемый скачок имеет асимметричный характер, поднятие критической энергии на переднем фронте происходит на $\Delta\gamma_{tr} = 0.9$ за 36 мс, а сам скачок — за 1 мс на заднем фронте. Принципиальная схема процедуры, а также соответствующее изменение первого порядка коэффициента скольжения приведены на рис. 2.6. Процедура скачка на сеансе У-70 приведена на рис. 2.7а, продольная линейная плотность сгустка относительно фазы ВЧ в момент скачка отражена на рис. 2.7б

Результаты моделирования продольного движения (рис. 2.8 и таблица 5) показаны для разных моделей при ускорении от 6.9 – 12.9 ГэВ для скачка критической энергии. А также для скачка с учётом импедансов вида $\frac{Z_n}{n} = \pm i \cdot const$

Время от момента инжекции, мс	Рабочая точка $\mathbf{v}_{x,y}$	Относительно скачка
290	9.921×9.842	До процедуры
295	9.917×9.808	Начало процедуры
310	9.849×9.787	Середина процедуры
326	9.780×9.771	Момент скачка
330	9.902×9.809	После

Таблица 4 — Изменение рабочей точки в процессе процедуры скачка критической энергии на У-70.

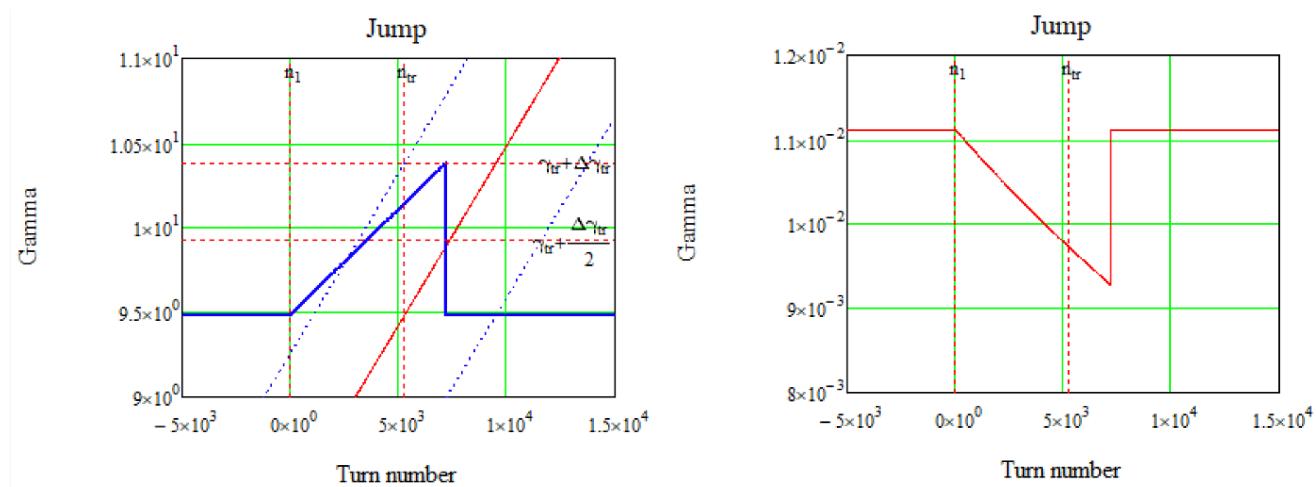


Рисунок 2.6 — а) Поднятие критической энергии при процедуре скачка; б) соответствующее изменение первого порядка коэффициента скольжения η_0 .

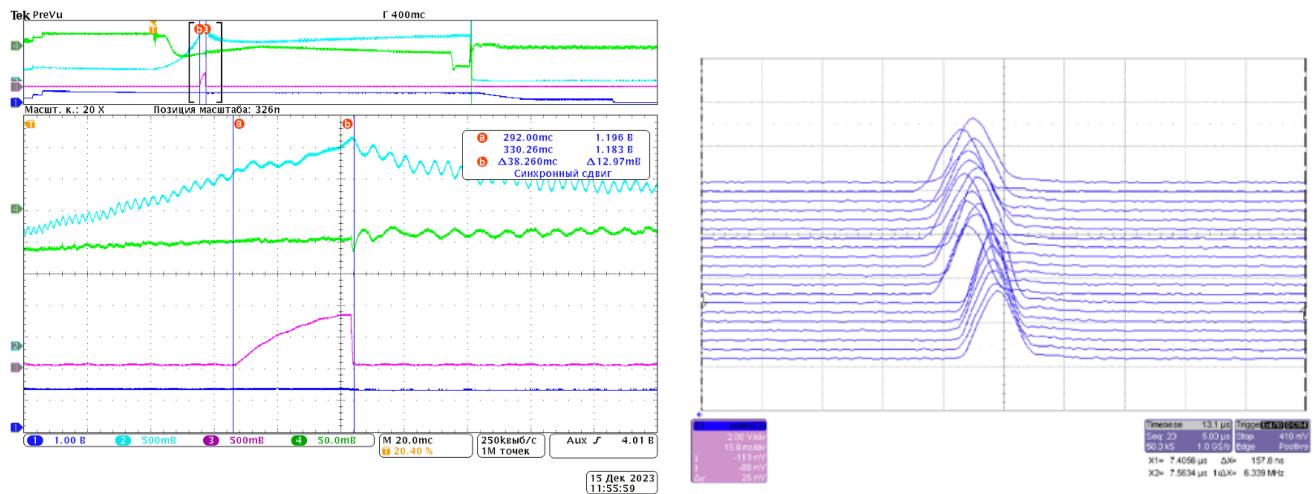


Рисунок 2.7 — а) С跳跃к критической энергии на сеансе У-70. Зеленая линия — сигнал с фазового датчика, фиолетовая — градиент в обмотках дополнительных квадрупольей, голубая — сигнал с пикового детектора; б) Продольная линейная плотность сгустка относительно фазы ВЧ в момент скачка.

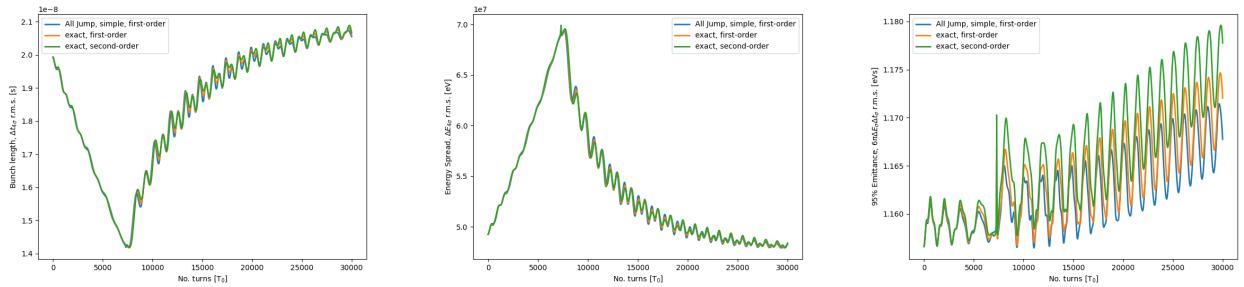


Рисунок 2.8 — Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 6.9 до 12.9 ГэВ для трёх моделей со скачком, без учёта импеданса. Синяя — учёт только первого порядка $\eta = \eta_0$, ‘simple’ solver, оранжевая — $\eta = \eta_0$, ‘exact’ solver, зеленая — $\eta = \eta_0 + \eta_1 \delta$, ‘exact’ solver.

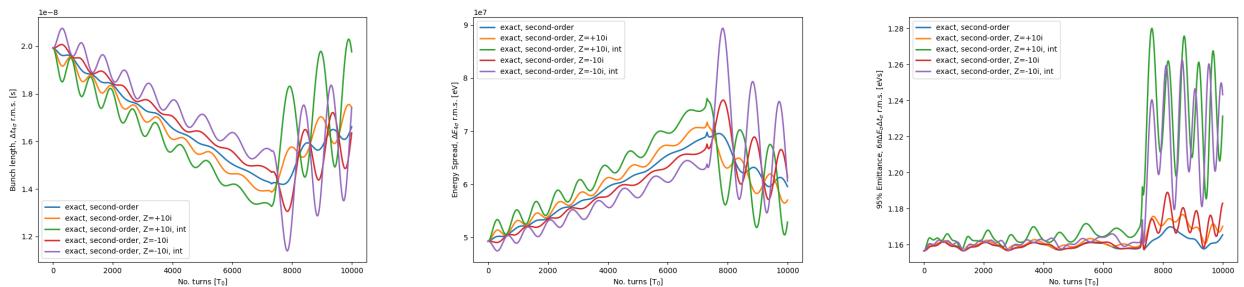


Рисунок 2.9 — Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 6.9 до 8.9 ГэВ со скачком, с учётом различного вида импеданса и интенсивностей.

и разных интенсивностей при ускорении 6.9–8.9 ГэВ (рис. 2.9). Начальные значения $\tau_L = 4t_\sigma \simeq 20$ нс при $E_0 = 6.9$ ГэВ, $\Delta E_0 = 4E_\sigma = 49.3$ МэВ, $\epsilon_{095\%} = 1.16$ эВ·с. Данные моделирования продольного движения соответствуют изменению длины сгустка в ходе ускорительного цикла на сеансе У-70 для низкоинтенсивного пучка (рис. 2.10).

При сравнении двух рассмотренных способов прохождения критической энергии: без скачка критической энергии и со скачком, можно установить, что при скачке продольная длина сгустка сокращается меньше. Таким образом и рассмотренные импедансы меньше возмущают сгусток. Рост эмиттанса наблюдается только при рассмотрении интенсивного сгустка, где число частиц $N_{beam} = 1 \times 10^{12}$ ppb.

Окончательно, было рассмотрено прохождение критической энергии в гармоническом ВЧ как с использованием метода скачка, так и без него. Проведено

Параметры моделирования	95% фазовый объем	Сохранение пучка	Особенности
$\alpha_1 = 0$, simple, Без импеданса	1.165	100%	Простая модель, рост эмиттанса отсутствует
$\alpha_1 = 0$, exact, Без импеданса	1.167	100%	Точная модель, рост эмиттанса отсутствует
$\alpha_1 = 0.01$, exact, Без импеданса	1.174	100%	Нелинейность отсутствует, рост эмиттанса отсутствует
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = -i \cdot 10$, $4 \cdot 10^{11}$ ppb	1.17	100%	Уменьшение длины после скачка γ_{tr}
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = +i \cdot 10$, $4 \cdot 10^{11}$ ppb	1.17	100%	Слабые квадрупольные колебания до скачка γ_{tr}
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = -i \cdot 10$, $1 \cdot 10^{12}$ ppb	1.23	99%	Длина сгустка существенно сокращается, небольшой рост эмиттанса
$\alpha_1 = 0.01$, exact, $Z_n/n = +i \cdot 10$, $1 \cdot 10^{12}$ ppb	1.23	99%	Большая амплитуда квадрупольных колебаний, небольшой рост эмиттанса

Таблица 5 — Результаты численного моделирования прохождения критической энергии скачком с учетом влияния различных импедансов для различных интенсивностей.

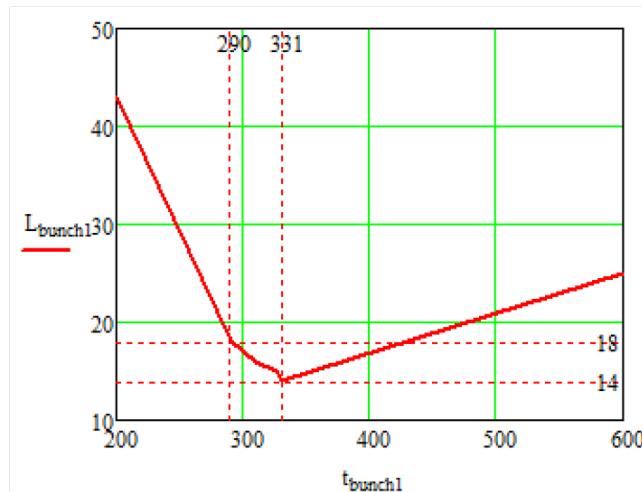


Рисунок 2.10 — Изменение длины сгустка в ходе ускорительного цикла на сеансе У-70.

численное моделирование продольной динамики для различных импедансов и интенсивностей сгустков, а также данные апробированы на сеансе протонного синхротрона У-70. Показано, что темп ускорения играет ключевую роль при прохождении критической энергии. Для его увеличения используют метод скачка критической энергии. Изменение критической энергии осуществляется при помощи модуляции дисперсионной функции, что позволяет контролировать продольный эмиттанс сгустка в момент прохождения критической энергии. Изученная динамика продольного движения вблизи критической энергии представляет интерес для дальнейшего изучения на комплексе NICA.

2.4 Особенности процедуры скачка критической энергии в синхротроне NICA для протонного пучка

Проблема прохождения критической энергии в синхротроне NICA (ОИЯИ г. Дубна) актуальна для экспериментов с протонами при энергии пучка 13 ГэВ, поскольку может приводить к росту эмиттанса и в конечном счёте накладывает ограничения на конечную светимость. Для экспериментов с тяжелыми ионами при энергии 4.5 ГэВ такой сложности не возникает, так как критическая энергия, характеристика кольца, 5.7 ГэВ.

Реализация скачкообразного прохождения критической энергии в регулярной структуре NICA со сдвигом бетатронной частоты ограничивает

величину скачка. Ограниченный темп изменения градиентов квадрупольей влечет ограниченный темп изменения критической энергии. Подобная схема скачка рассмотрена для отличных по своему принципу работы ускоряющих ВЧ станций, барьерную и гармоническую. Кроме того, будет проведено сравнение с методикой прохождения скачком на У-70.

Магнитооптическая структура поворотных арок NICA состоит из 12 ФОДО ячеек с подавленной на краях дисперсией методом отсутствующих магнитов. С помощью программ для численного моделирования движения пучка в магнитных системах ускорителей MADX [27] и OptiM [28] изучена зависимость изменения критической энергии от частоты бетатронных колебаний, при этом изменялся градиент в фокусирующих квадрупольных линзах. Именно в этих элементах расположен максимум β_x и D_x . Как видно из рис. 2.11, в имеющейся структуре $\Delta\gamma_{tr} = 1.1\Delta q$. Максимальная вариация частоты или рабочей точки составляет $\pm\Delta q = 0.05$, что соответствует измерению критической энергии порядка $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$. Соответствующее суммарное изменение градиента $\Delta K_l = 4\pi\Delta q\beta_a = 0.055 \text{ м}^{-1}$, где $\beta_a = 11.5 \text{ м}$ – средняя бета-функция. Тогда максимальное изменение градиента в одном квадруполе $\Delta G = \Delta K_l(BR/N_F l) = 0.5 \text{ Тл}/\text{м}$, где $N_F = 24$ – количество фокусирующих линз, $B\rho = 22 \text{ Тл}\cdot\text{м}$ – магнитная жесткость при кинетической энергии протонов 5.7 ГэВ (критическая энергия), $l = 0.47 \text{ м}$ – длина квадруполя. При этом ограничение скорости нарастания тока приводит к ограничению в изменении градиента квадрупольных линз. Темп изменения критической энергии $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ с}^{-1}$ [33].

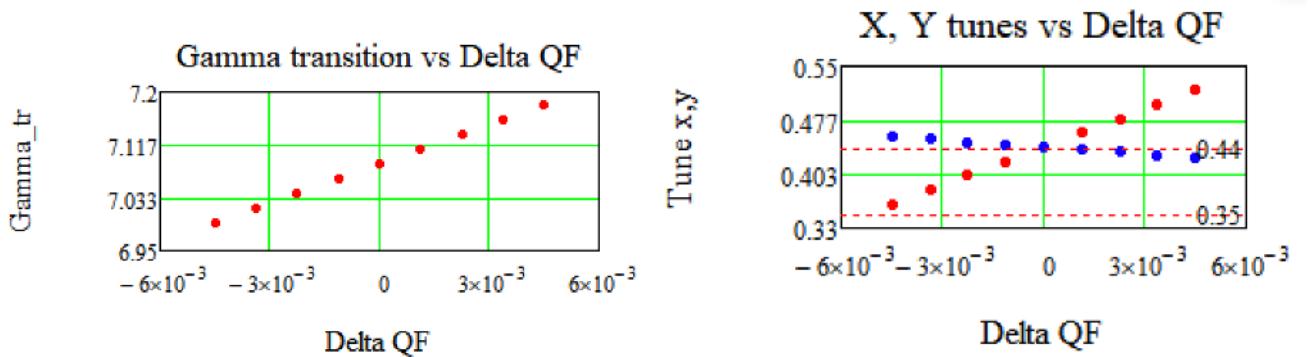


Рисунок 2.11 – Зависимость критической энергии и рабочей точки от возмущения градиента квадрупольных линз.

Как было показано, на У-70 производится скачок критической энергии. Ускорение осуществляется гармоническим ВЧ с темпом $(d\gamma/dt)_{U-70} = 40 \text{ с}^{-1}$. Скачок достигается также искажением дисперсионной функции, однако

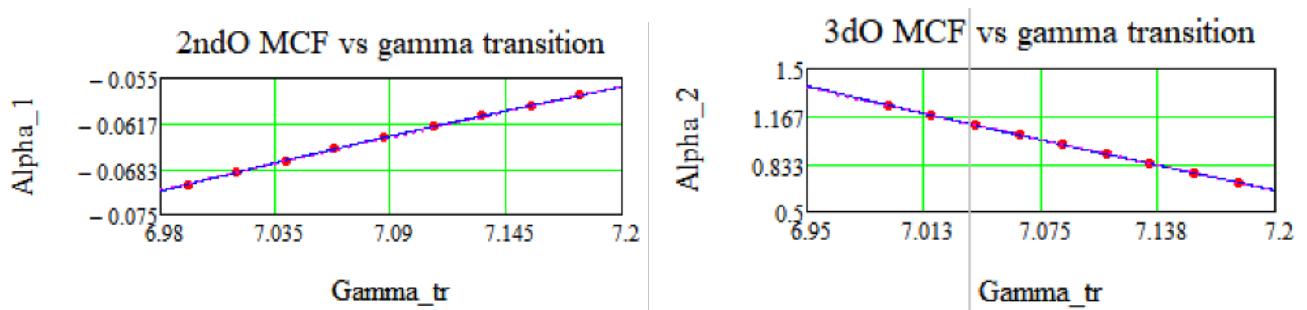


Рисунок 2.12 — Зависимость высших порядков разложения коэффициента расширения орбиты от критической энергии.

без смещения рабочей точки. Изменение критической энергии происходит на $\Delta\gamma_{\text{tr}}^{\text{U-70}} = 0.9$ за 1 мс, то есть в 10 раз больше по сравнению с приведённым скачком для NICA, что качественно различает две рассмотренные методики.

Более того, темп ускорения непосредственно влияет на динамику продольного движения. В NICA имеется 3 различные ВЧ станции: ВЧ-1 – барьерное, четыре ВЧ-2, восемь ВЧ-3 – гармонические с гармоническим числом 22 и 66 соответственно. Максимальное суммарное напряжение составляет порядка $(d\gamma/dt)_{\text{RF2}} = 30 \text{ c}^{-1}$, $(d\gamma/dt)_{\text{RF3}} = 300 \text{ c}^{-1}$ и значительно больше, чем для индукционного ускорения в барьерном $(d\gamma/dt)_{\text{RF1}} = 0.2 \text{ c}^{-1}$ [65].

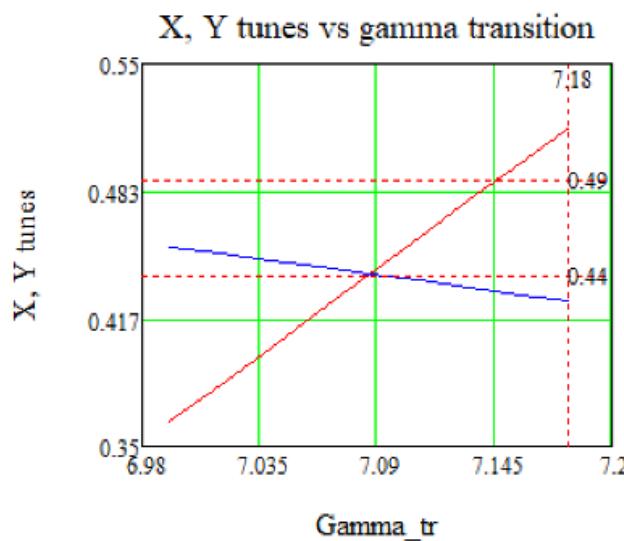


Рисунок 2.13 — Зависимость бетатронной частоты в x, y – плоскости от критического значения Лоренц-фактора γ_{tr} при модуляции дисперсионной функции изменением градиента в фокусирующих линзах.

2.4.1 Обеспечение стабильности пучка с точки зрения динамической апертуры при процедуре скачка критической энергии

Поскольку модуляция дисперсионной функции происходит за счёт изменения градиента во всех квадрупольях поворотной арки, то происходит и смещение рабочей точки в x -плоскости в течение процедуры скачка критической энергии. При измененных параметрах квадрупольных линз была проведена оценка динамической апертуры, определяющей стабильную область для движения частиц в поперечной плоскости. Соответствующие расчеты были проведены с использованием программ OptiM и MADX.

Более того, если следовать тому, что при подходе к критической энергии мы вынуждены уйти вниз по частоте в горизонтальной плоскости до значений $\nu_x = 9.3627$, а в вертикальной плоскости $\nu_y = 9.4541$, чтобы получить критическую энергию $\gamma_{tr} - 2 \cdot \Delta\gamma_{tr} = 6.997$, то динамическая апертура в горизонтальной плоскости при этих значениях бетатронных частот полностью исчезает, что показано на рис. 2.14а.

По этой причине рассмотрен другой вариант, симметричного скачка. Сначала плавно поднимается критическая энергия до величины $\gamma_{tr} + \Delta\gamma_{tr} \approx 7.13$, затем производим быстрый скачок вниз на $2 \cdot \Delta\gamma_{tr}$ до величины $\gamma_{tr} - \Delta\gamma_{tr} \approx 7.04$. При этом рабочая точка изменяется от $\nu_x = 9.44$ и $\nu_y = 9.44$ (2.14б) до величины перед скачком $\nu_x = 9.4769$ и $\nu_y = 9.43$ (рис. 2.14в) и после скачка вниз $\nu_x = 9.4015$ и $\nu_y = 9.447$ (рис. 2.14г). В этом случае, динамическая апертура сохраняется и изменение частоты остается в диапазоне $\Delta q = \pm 0.05$.

2.4.2 Оценка возможности использования гармонического ВЧ

Ускорение в гармоническом ВЧ-резонаторе достигается путем смещения фазы пучка относительно фазы ВЧ. В NICA имеется гармонические ВЧ-станции: четыре ВЧ-2, восемь ВЧ-3 – с гармоническим числом 22 и 66 соответственно. Для которых максимальное суммарное напряжение составляет порядка $(d\gamma/dt)_{RF2} = 30 \text{ c}^{-1}$, $(d\gamma/dt)_{RF3} = 300 \text{ c}^{-1}$.

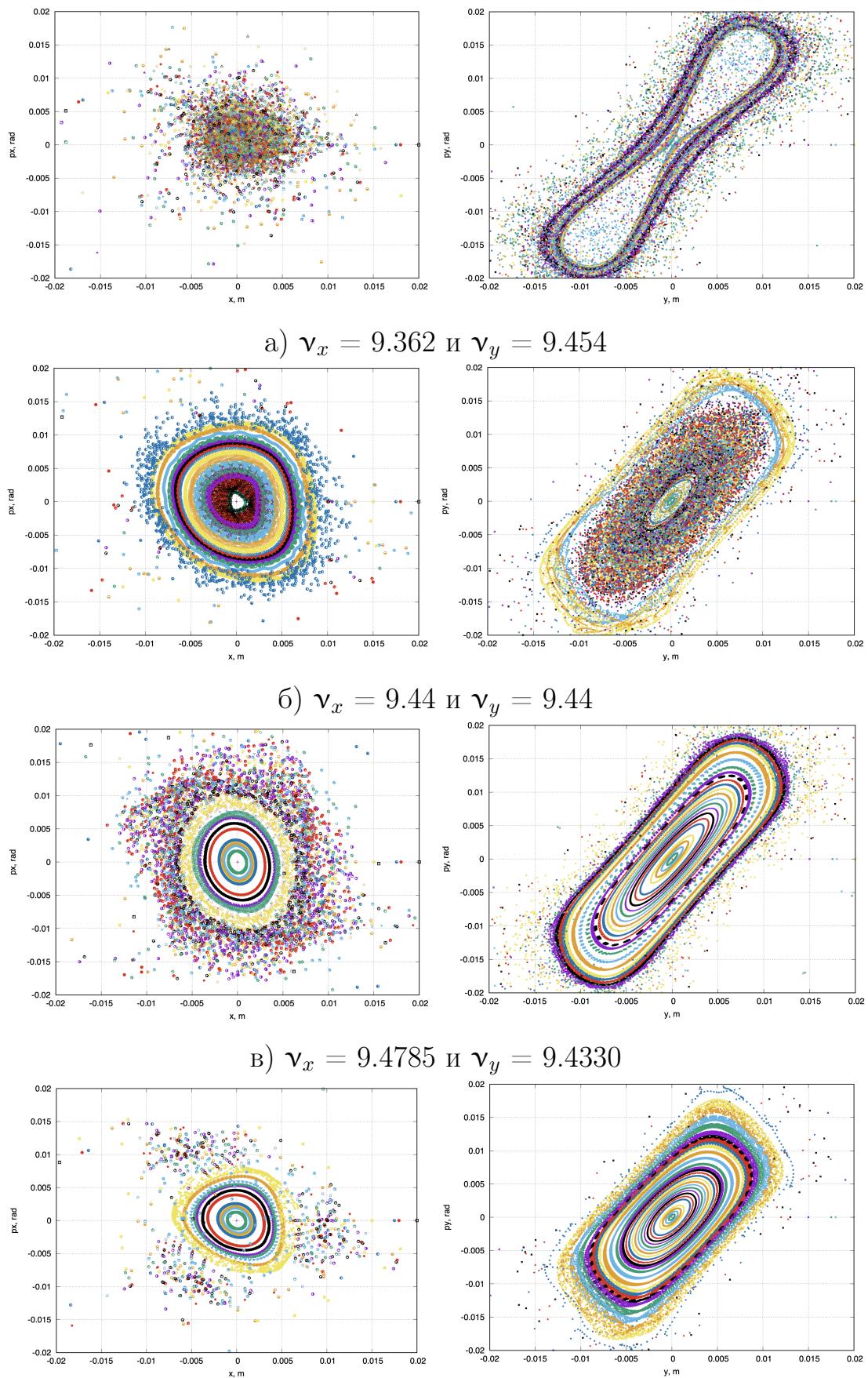


Рисунок 2.14 — Динамические апертуры (x —плоскость слева, y —плоскость справа) для различных (а-г) рабочих точек с $\frac{dp}{p} = 0$

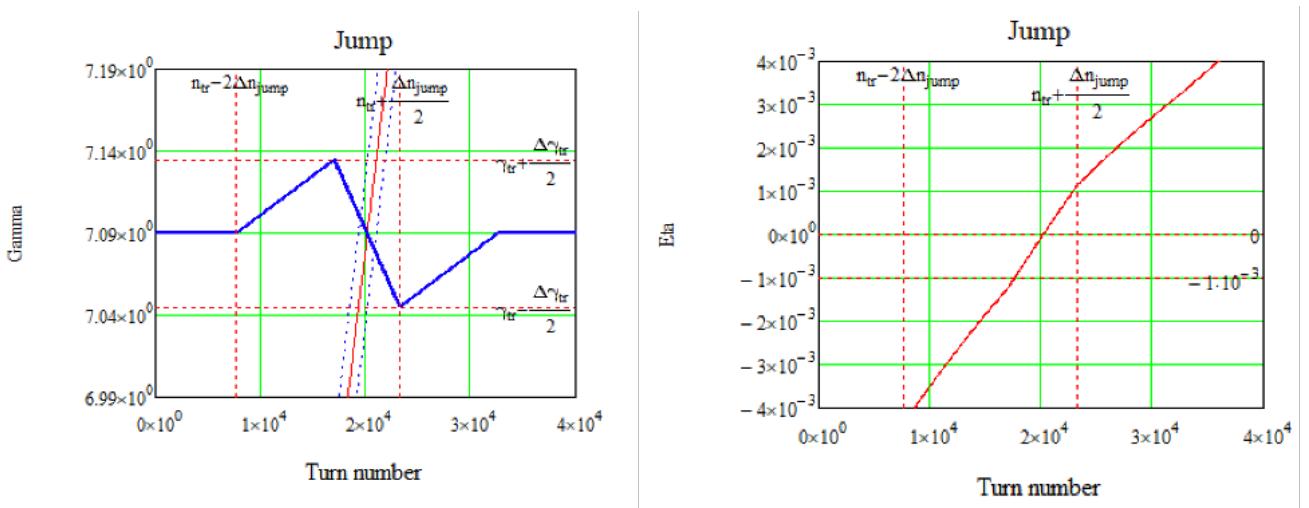


Рисунок 2.15 — а) Принципиальная схема поднятия критической энергии на NICA в гармоническом ВЧ с темпом $(d\gamma/dt)_{RF2} = 30 \text{ c}^{-1}$ при процедуре скачка на $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$ с темпом $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ c}^{-1}$; б) соответствующее изменение первого порядка коэффициента скольжения $\eta_0 = \pm 1 \times 10^{-3}$.

Рассмотрим темп ускорения в гармоническом ВЧ-2 $(d\gamma/dt)_{RF2} = 30 \text{ c}^{-1}$, он больше максимального темпа изменения критической энергии $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ c}^{-1}$. На рис. 2.15а показана схема симметричного скачка от $\gamma_{tr} + \Delta\gamma_{tr}/2$ до $\gamma_{tr} - \Delta\gamma_{tr}/2$. При этом предварительное увеличение критической энергии и соответствующее восстановление до стационарного значение может происходить не с максимальным темпом изменения критической энергии, а медленнее. Таким образом, время нахождения вблизи нулевого значения η сокращается. По сравнению со случаем скачка для У-70, коэффициент проскальзывания за время скачка изменяется медленно, что показано на рис. 2.15б.

Долгое пребывание вблизи нулевого значения η является опасным для продольной динамики пучка. Именно поэтому и применяется процедура скачка (быстрого пересечения) критической энергии. В случае применения гармонического ВЧ для представленного скачка из-за ограниченной величины $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$, а также ограниченного темпа изменения критической энергии $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ c}^{-1}$, сам скачок оказывается крайне незначительным.

2.4.3 Применение барьера ВЧ

Барьерное ВЧ-1 генерирует барьерные импульсы 5 кВ для удержания пучка, а ускорение может достигаться индукционно, меандром с напряжением 300 В за оборот [65]. Темп ускорения $(d\gamma/dt)_{RF1} = 0.2 \text{ с}^{-1}$ значительно ниже по сравнению с гармоническим.

С скачок критической энергии не зависит от типа используемого ВЧ и происходит за тоже время 10 мс, что и для случая гармонического. Однако, продольная динамика в таком ВЧ отличается от случая гармонического. Главным остается то, что ограничены 1) возможная величина скачка $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$; 2) темп изменения критической энергии $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ с}^{-1}$. Ограничение на величину скачка приводит к ограничению на скачок коэффициента проскальзывания $\eta_0 = \pm 2.5 \times 10^{-4}$ (рис. 2.16). Барьерное ВЧ подразумевает относительно долгое удержание пучка в окрестности около нулевого значения η_0 . При ускорении, значение коэффициента скольжения η приближается к нулю для всех частиц, однако из-за ненулевого разброса по импульсам δ , слагаемое $\eta_1\delta$ начинает быть сравнимо с η_0 и играет важную роль на динамику вблизи критической энергии. Если не предпринимать никаких мер, то для частиц, преодолевших критическую энергию, знак коэффициента скольжения меняется. Процедура скачка позволяет, во-первых, в течение поднятия критической энергии, удерживать пучок на расстоянии, достаточном, чтобы все частицы имели один и тот же знак коэффициента скольжения. Во-вторых, обеспечить быстрый переход к новому состоянию, где коэффициент скольжения меняет знак, но для всех частиц снова имеет одинаковый знак. Стабильность обеспечивается сменой полярности удерживающих ВЧ-барьеров.

Для барьера ВЧ влияние дополнительного напряжения от эффекта пространственного зарядка не опасно, так как исходя из ур. 2.9 видно, что возбуждение возникает только при наличии ненулевой производной распределения, которое может вытолкнуть частицы вне сепаратрисы (рис. 2.17). Если же распределение равномерное, то дополнительного напряжения не возникает. Профиль пучка в барьере потенциале имеет ненулевой градиент только по краям, где частицы отражаются от барьера, и распределение может быть искажено.

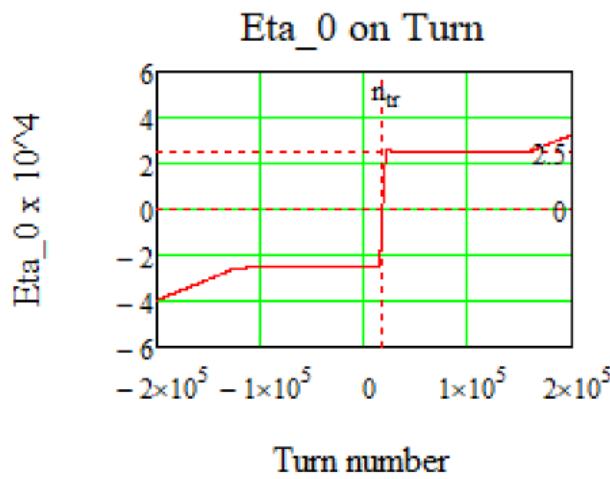


Рисунок 2.16 — Изменение первого порядка коэффициента скольжения η_0 при процедуре скачка с использованием барьерного ВЧ.

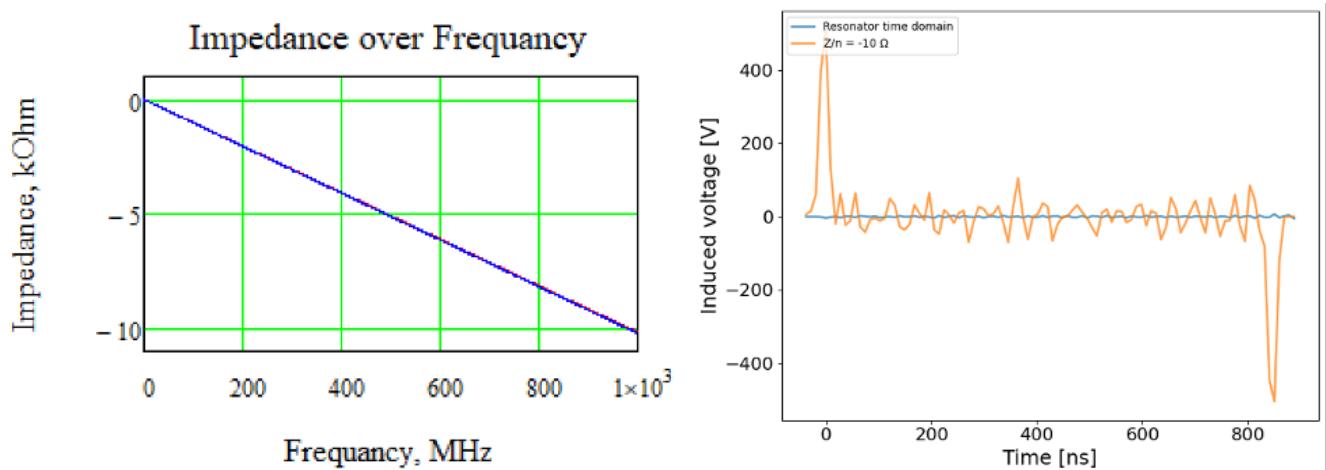


Рисунок 2.17 — Слева — импеданс пространственного заряда; справа — Напряжение, создаваемое пространственным зарядом вдоль профиля пучка в продольной плоскости.

В наиболее экстремальном случае, можно выделить пять основных состояний продольной динамики, основанных на изменении критической энергии γ_{tr} (рис. 2.18):

1. Ускорение от энергии инжекции E_{inj} со стационарным значением γ_{tr}^{stat} ;
2. Плавное увеличение γ_{tr} параллельно энергии частиц до пикового значения, коэффициент скольжения η_0 приобретает минимально возможное значение, приближаясь к нулевому значению;
3. Переход через стационарное значение критической энергии, при этом η_0 пересекает нулевое значение для всех частиц. Это происходит в отсутствие барьеров, за это время фазовый портрет изменяется незначительно;

4. Плавное восстановление γ_{tr} до стационарного значения, также параллельно энергии частиц с захватом пучка барьерами с обратной полярностью;
5. Ускорение до энергии эксперимента со стационарным значением критической энергии γ_{tr}^{stat} .

Стоит отметить, что состояния 2 и 4 являются экстремальными и в реальном случае, изменение может быть более плавным.

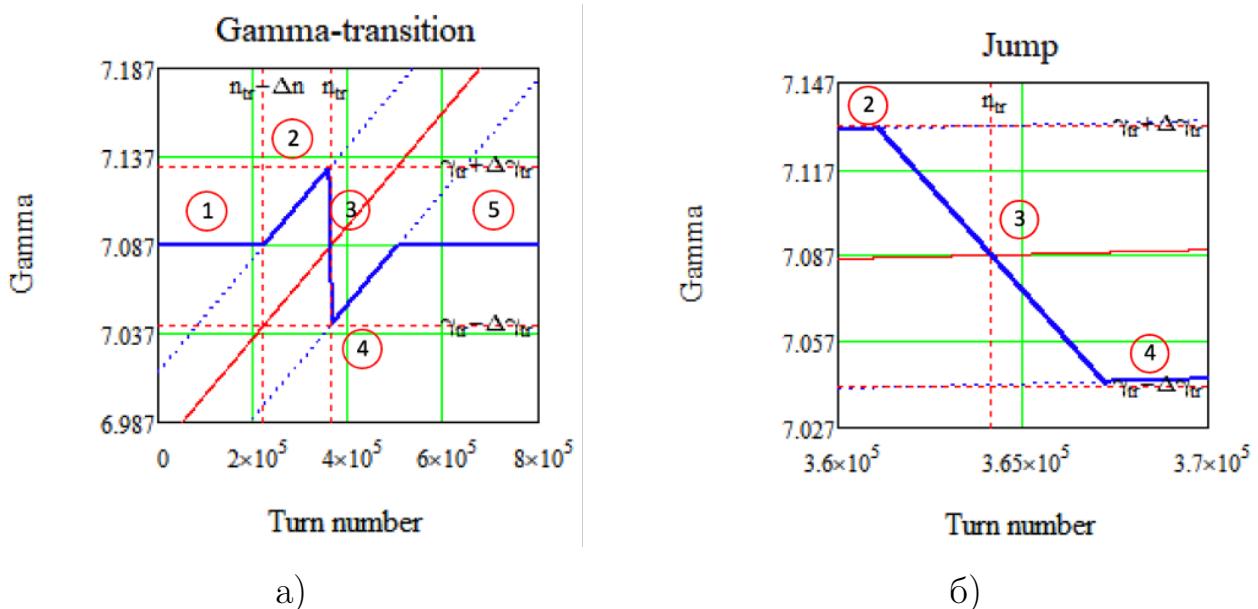


Рисунок 2.18 — Схема скачка критической энергии. Синяя линия – фактическая критическая энергия ускорителя γ_{tr} , красная линия – энергия референсной частицы.

Для моделирования прохождения критической энергии с использованием ВЧ барьера типа (рис. 2.19), рассмотрим более формально создаваемый им потенциал:

$$g(\varphi) = \begin{cases} -\text{sign}(\eta), & -\pi/h_r \leq \varphi \leq 0 \\ \text{sign}(\eta), & 0 < \varphi \leq \pi/h_r \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (2.11)$$

где η – коэффициент скольжения (slip-factor), $h_r = \frac{\pi}{\varphi_r}$ – гармоническое число для отражающего барьера и φ_r – соответствующая фаза. В уравнении 2.11 учтено, что при прохождении через критическую энергию, знак η меняется и, соответственно, полярность ВЧ барьеров.

Поскольку при моделировании ур. 2.4, может быть использован только гармонический потенциал, необходимо рассмотреть разложение сигнала в

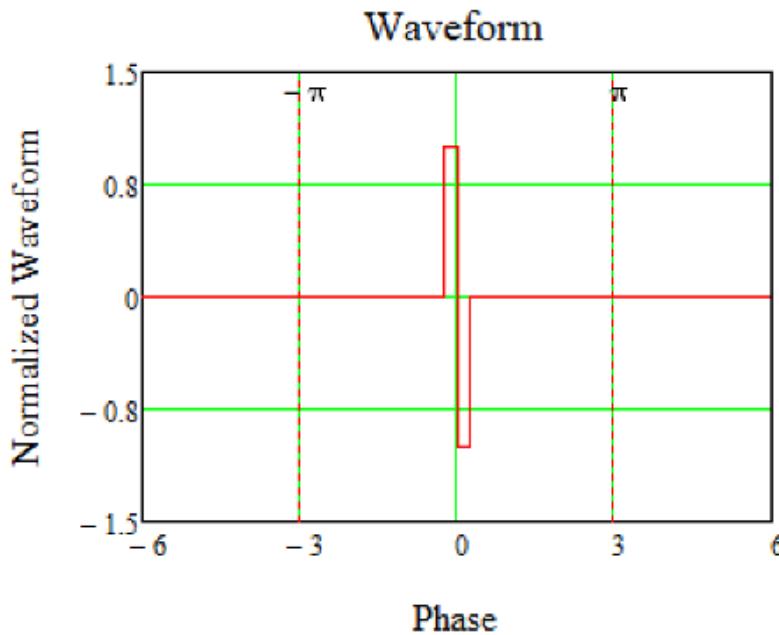


Рисунок 2.19 — Нормализованная форма сигнала от ВЧ барьера.

соответствующий гармонический ряд. Коэффициенты Фурье-разложения для приведенного прямоугольного сигнала даются выражением [66]:

$$b_n = \text{sign}(\eta) \frac{2}{n\pi} \left[1 - \cos\left(\frac{n}{h_r}\pi\right) \right], \quad (2.12)$$

где n – номер гармоники. Для создания плавной формы сигнала, используется сигма-модуляция, сохраняющая симметрию сигнала:

$$\sigma_{m,n} = \text{sinc}^m \frac{n\pi}{2(N+1)}, \quad (2.13)$$

где N – количество членов гармонического разложения. Таким образом, напряжение n -ой гармоники:

$$V_n = V^{\text{peak}} b_n \sigma_{m,n}. \quad (2.14)$$

На рисунках 2.20 представлены полученные формы сигнала и соответствующие напряжения для гармоник.

Наиболее опасными с точки зрения разрушения пучка, являются состояния 2-3-4, при которых изменяются параметры ускорителя. С точки зрения динамики, состояния 2 и 4 являются симметричными. Профиль пучка в продольной плоскости равномерный, а энергетический разброс гауссов. Состояние 2 и 4 характерны тем, что коэффициент скольжения для равновесной частицы остается неизменными, а критическая энергия меняется синхронно с энергией

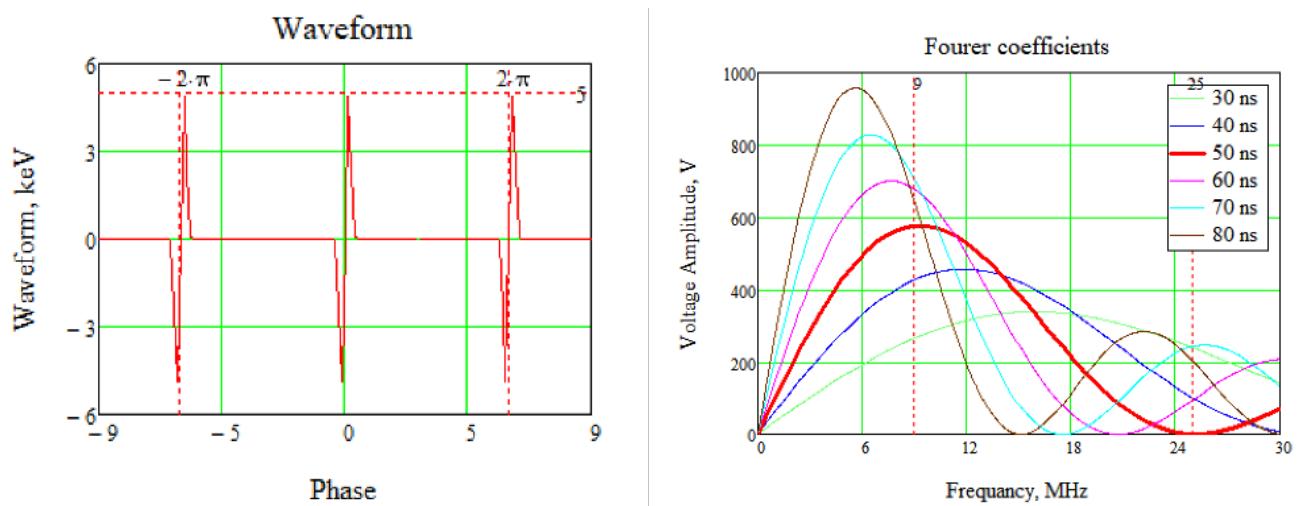


Рисунок 2.20 — Разложение сигнала от ВЧ барьерного типа в ряд Фурье по синусоидальным гармоникам. Слева – форма ВЧ барьеров, справа – амплитуды гармоник в зависимости от частоты для разной ширины отражающего барьера.

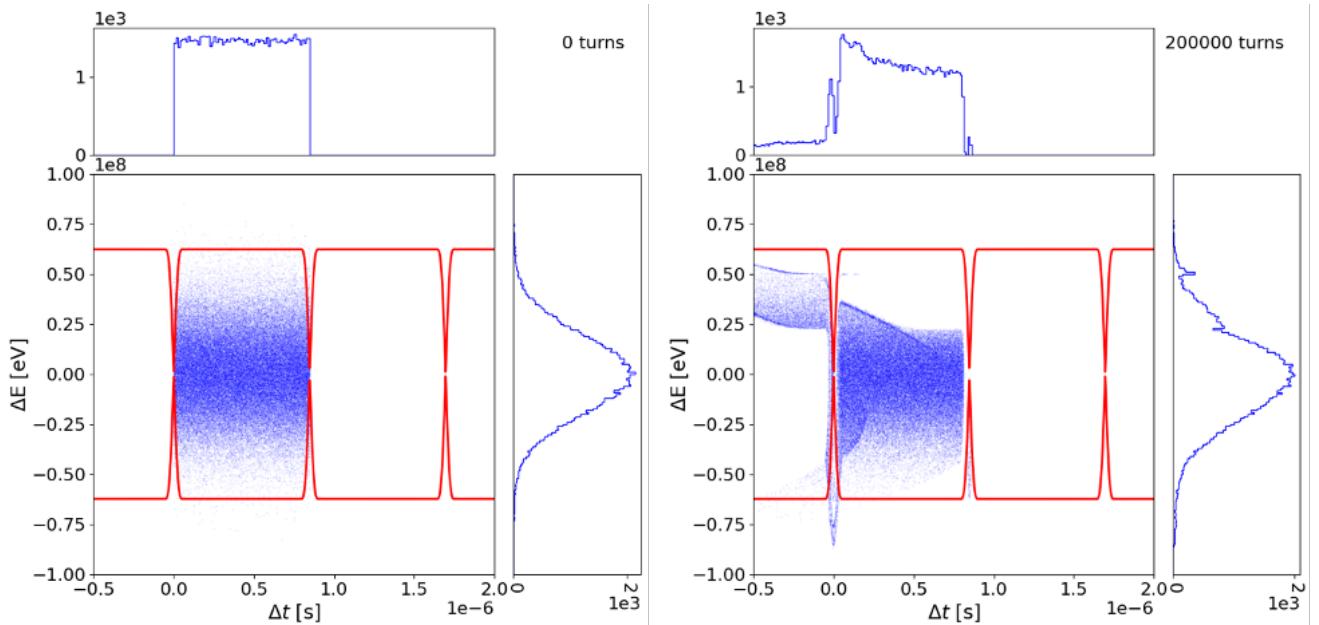


Рисунок 2.21 — Фазовая плоскость при удержании пучка внутри ВЧ-барьера. Слева – начальное распределение, справа – распределение после 2×10^5 .

пучка в течение порядка 2×10^5 оборотов. Таким образом, удержание пучка при стационарном значении критической энергии эквивалентно ускоренному движению пучка в структуре с меняющимися параметрами. Как видно на рисунках 2.21 профиль пучка смещается к левому барьеру, это связано с тем, что для частиц с положительными $\delta > 0$ коэффициент скольжения $\eta_{+\delta}$ больше, чем для частиц с отрицательным $\delta < 0$ $\eta_{-\delta} : \eta_{+\delta} > \eta_{-\delta}$, поскольку $\eta_1 < 0$.

Состояние 3 – быстрое изменение параметров в течение 6×10^3 оборотов (10 мс). ВЧ-барьеры выключены на время скачка, чтобы не разрушить пучок

(рис. 2.22). Влияние пространственного заряда наиболее важно в отсутствие барьеров, так как отсутствует внешняя удерживающая сила. Трекинг сделан с учетом описанного выше импеданса пространственного заряда. За время скачка существенного изменения профиля пучка не произошло.

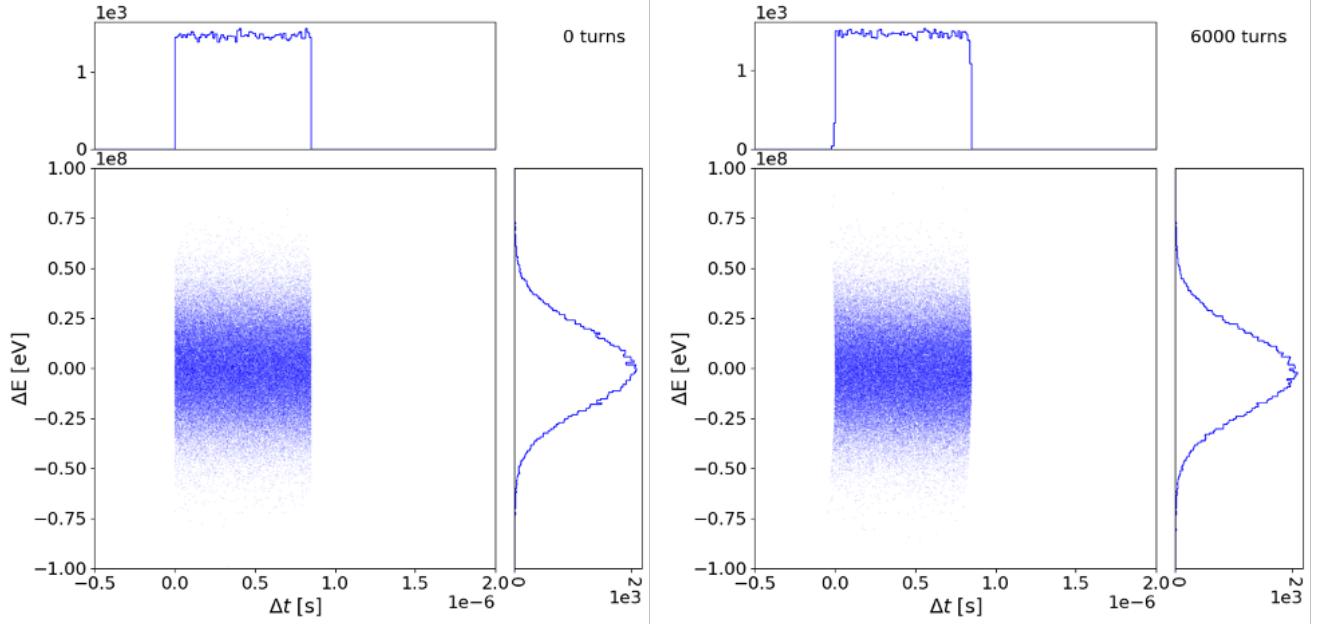


Рисунок 2.22 — Фазовая плоскость при скачке, ВЧ-барьеры отключены. Слева – начальное распределение, справа – распределение после 6×10^3 оборотов.

2.4.4 Продольная микроволновая неустойчивость

Для коллайдерного эксперимента светимость является ключевой величиной. В простейшем случае, столкновение симметричных сгустков, светимость дается формулой [67]:

$$L = \frac{n_{\text{bunch}} N_1 N_2 f_0}{4\pi \sqrt{\varepsilon_x \varepsilon_y} B^*} \Phi_{\text{HG}}, \quad \Phi_{\text{HG}}(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{e^{-u^2} du}{1 + (\alpha u)^2}, \quad \alpha = \frac{\sigma_s}{B^*}, \quad (2.15)$$

где n_{bunch} – количество сгустков, N_1, N_2 – количество частиц в сталкивающихся сгустках, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – продольные эмиттансы, f_0 – частота обращения, Φ_{HG} – параметр песочных часов, σ_s – гауссов параметр продольного размера, B^* – бета-функция в точке столкновения. Как видно, данная формула отражает принципиальную зависимость от множества параметров как пучка, так и магнитооптики.

Прохождение через критическую энергию оказывает существенное влияние на продольную динамику. Светимость явно зависит от продольной длины пучка только в параметре песочных часов. $\Phi_{\text{HG}}(1) \cong 0.76$, $\Phi_{\text{HG}}(2) \cong 0.55$, $\Phi_{\text{HG}}(5) \cong 0.29$, то есть при неизменных параметрах и увеличении только длины сгустка в 2 раза, влияние эффекта песочных часов уменьшит исходную светимость на 30% $L_2 = 0.7L_1$. Для NICA предполагается достичь $\alpha = 1$, $\sigma_s = 0.6$ м, бета-функция в точке встречи $B^* = 0.6$ м. Таким образом учтена только явная зависимость от продольной длины. Неявно, светимость зависит от продольного эмиттанса сгустка так как накладывает ограничение на количество частиц.

Рассмотрим эволюцию продольного эмиттанса в процессе ускорения в барьере ВЧ. Для достижения светимости порядка $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, конечный среднеквадратичный нормализованный продольный эмиттанс сгустка равен $\varepsilon_{\text{sin}}^{\text{exp}} = n_{\text{bunch}}\gamma_{\text{exp}}\beta_{\text{exp}}\pi\sigma_s\sigma_p = 0.9$ м ($\gamma_{\text{exp}} = 14.3$, $n_{\text{bunch}} = 22$, $\sigma_s = 0.6$ м, $\sigma_p = 1.5 \cdot 10^{-3}$) при энергии эксперимента 12.6 ГэВ. Формируется из эмиттанса равномерного сгустка в барьере ВЧ $\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{fin}}$, разделенного на 22 сгустка $\varepsilon_{\text{sin}}^{\text{exp}} = D_{\text{gym}}\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{fin}}$ при помощи ВЧ гимнастики. Эмиттанс барьера ВЧ подвержен влиянию критической энергии на эмиттанс охлажденного пучка после инжекции $\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{cool}}$, $\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{fin}} = D_{\text{tr}}\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{cool}}$. Охлажденный пучок формируется после инжекции, накопления и электронного охлаждения на 2 – 3 ГэВ $\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{cool}} = D_{\text{cool}}\varepsilon_{\text{bb}}^{\text{inj}}$. Только охлаждение уменьшает эмиттанс $D_{\text{cool}} < 1$, остальные эффекты, только увеличивают его $D_{\text{gym}} > 1$, $D_{\text{tr}} > 1$. Для гимнастики было принято $D_{\text{gym}} = 1.3$, влияние D_{tr} будет обсуждено далее.

Ограничение на порог микроволновой неустойчивости зависит от многих параметров и для равномерного распределения, характерного именно барьерному ВЧ определяется критерием Кейл-Шнель. В модифицированном виде этот критерий приведен в [68].

$$K_1 K_2 \frac{E_0}{(|Z_\parallel|/n) I} \frac{A_i}{Z_i} \gamma \beta^2 |\eta| \sigma_p^2 \geq 1 \quad (2.16)$$

Ток $I = \frac{e\beta c N_p Z_i}{L_B}$, тут L_B – эффективная длина пучка или для барьера ВЧ это эквивалентно расстоянию между удерживающими барьерами (приближено, без учёта краевых эффектов). Отсюда видно, что возникает ограничение на количество частиц N_p ($A, Z = 1$ для протонов).

$$N_p \leq K_1 K_2 \frac{E_0}{(|Z_\parallel|/n) ec} |\eta| \gamma \beta \sigma_p^2 L_B \quad (2.17)$$

или, если учесть, что нормализованный эмиттанс для барьерного ВЧ $\varepsilon_{\text{tr}} = \gamma_{\text{tr}} \beta_{\text{tr}} \sqrt{\pi} / 2\sigma_p L_B$ ($\sqrt{\pi}/2$ так как распределение по импульсам имеет гауссов вид, а продольный размер – равномерный), то справедливо для барьерного ВЧ

$$N_p \leq K_1 K_2 \frac{E_0}{(|Z_{\parallel}|/n) ec} |\eta| \frac{4\varepsilon_{\text{tr}}^2}{\pi \gamma \beta L_B} \quad (2.18)$$

Таким образом при нахождении вблизи малого значения $|\eta|$ количество частиц, ограничено длиной сгустка в барьерном ВЧ. При этом нормализованный эмиттанс определяется из необходимости иметь достаточную светимость $\varepsilon_{\text{tr}} = \varepsilon_{\text{bb}}^{\text{fin}} = \varepsilon_{\text{sin}}^{\text{exp}} / D_{\text{gym}} = 0.7$ м. А длина сгустка может быть варьирована расстоянием между барьерами.

Требуемое количество частиц для достижения светимости порядка 2×10^{32} см $^{-2}$ с $^{-1}$ – $N_{\text{exp}} = 1 \times 10^{12}$ для конечного сгустка, таким образом требуемое количество частиц в барьерном ВЧ как минимум должно быть 2.2×10^{13} . Для упомянутого скачка, энергия $E_0 = E_{\text{tr}} = 5.7$ ГэВ, $\gamma_{\text{tr}} = 7.08$, $\beta = 0.99$ вблизи $|\eta_0| = 2.5 \times 10^{-4}$ для расчётов принято $Z_{\parallel}/n = 20$ Ом, $K_1 = 1$, $K_2 = 5.4$.

$$N_p \leq 1 \times 5.4 \frac{5.7 \times 10^9 \text{eV}}{20\Omega \cdot 1.6 \times 10^{-19} \text{K} \cdot 3 \times 10^8 \text{m/s}} |2.5 \times 10^{-4}| \frac{4 \cdot (0.7 \text{m})^2}{7.08\pi \cdot L_B} \quad (2.19)$$

Эта зависимость представлена на рис. 2.23. Таким образом ограничение для расстояния между барьерами $L_B = C_{\text{ring}}/2 = 503.04/2 = 251.52$ м ограничение на количество частиц $N_p \leq 2.78 \times 10^{12}$, для $L_B = C_{\text{ring}}/16$, $N_p \leq 2.2 \times 10^{13}$.

Исходя из этих оценок, достичь конечного числа частиц $N_{\text{exp}} = 1 \times 10^{12}$ для каждого из 22 сгустков, представляется трудной задачей, вследствие возникновения продольной микроволновой неустойчивости вблизи критической энергии для интенсивного равномерного сгустка в барьерном ВЧ. Требуется вариация расстояния между барьерами для компенсации возникающей неустойчивости.

2.4.5 Сохранение поляризации при прохождении критической энергии

Во время процедуры скачка также необходимо убедиться, что сохраняется поляризация, являющаяся суммой проекций спин-векторов на выбранную ось.

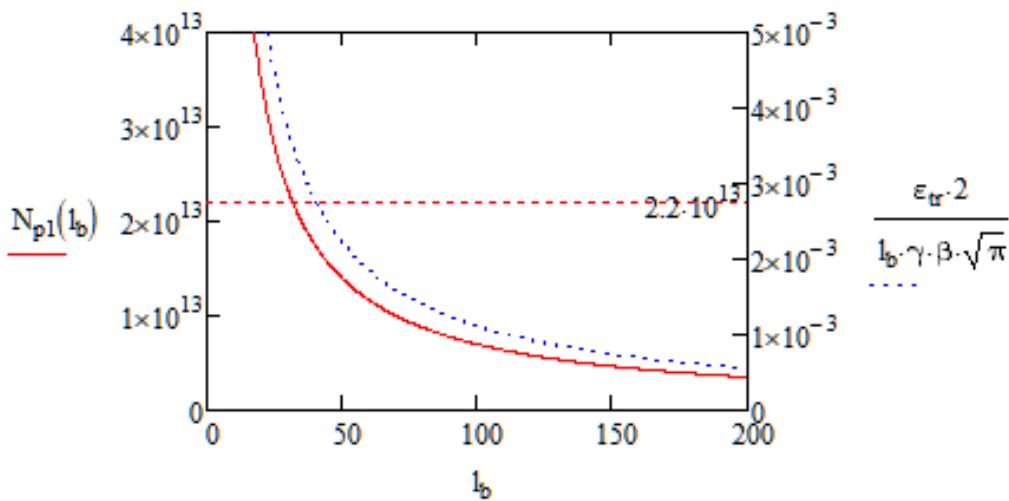


Рисунок 2.23 — Зависимость количества частиц в барьерном ВЧ и разброса по импульсам от длины между удерживающими барьерами с точки зрения продольной микроволновой неустойчивости.

Исходя из аналитических соображений Т-БМТ уравнения, влияние поперечного магнитного поля, может только вращаться спин-вектора вдоль вертикальной оси, при этом поляризация не изменяется. Действие ускоряющего продольного электрического поля также не оказывает влияние на поляризацию сгустка.

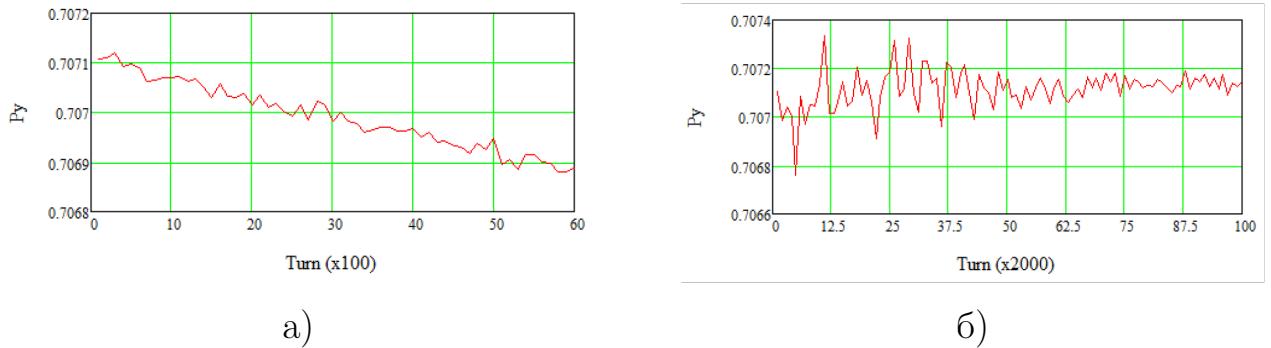


Рисунок 2.24 — Изменение поляризации во время процедуры скачка критической энергии: (а) ускорение на этапе 2, (б) скачок на этапе 3.

При моделировании рассматриваются частицы с различными доступными начальными параметрами. Инжир. на рисунке 2.24 показано изменение поляризации на 2-м (2 раза по 10^5 оборотов) и 3-м (6 раз по 10^3 оборота) этапах процедуры перехода. Поляризация здесь определяется как сумма проекций вектора спина на ось Y всех частиц и существенно не менялась в ходе процедуры. Стоит отметить, что COSY Infinity позволяет отслеживать вектор спина только для небольшого числа частиц, а не для ансамбля, что плохо для изучения поляризации.

Более подробно спиновая динамика будет рассмотрена в ЭДМ-эксперименте всего комплекса NICA-Nuclotron в Главе 4.

Выводы

Рассмотрена продольная динамика пучка вблизи критической энергии, а также при её пересечении. Такая особенность характерна для структуры, в которой энергия инжекции пучка меньше критической энергии установки и возникает необходимость её преодоления для ускорения до конечной энергии эксперимента.

1. Воздействие критической энергии на продольную динамику пучка вызывает увеличение фазового объёма в результате неадиабатичности и нелинейности движения в области энергии, близкой к критической;
2. Для преодоления критической энергии может быть применена процедура скачка, которая подразумевает кратковременное изменение дисперсионной функции. Это может быть достигнуто путём использования дополнительных квадруполей или квадруполей поворотной арки. В первом случае можно добиться сохранения частоты, а во втором — необходимо контролировать изменение рабочей точки и стабильность в поперечной плоскости. Таким образом, определяется величина и темп изменения критической энергии при проведении процедуры скачка;
3. Гармонический или барьерный тип ВЧ оказывает влияние на темп ускорения, а также продольное распределение внутри сепаратрисы. В сочетании со схемой процедуры скачка, необходимо сравнивать темп изменения критической энергии таким образом, чтобы относительный темп при пересечении критической энергии был в разы выше темпа ускорения;
4. Проведено исследование влияния простейших моделей импедансов на динамику. Результаты показали, что для интенсивных сгустков влияние импедансов оказывается значительным. Применение более точных моделей импедансов может существенно углубить понимание реальной динамики системы;

5. В условиях, близких к критическим для интенсивного пучка, развивается продольная микроволновая неустойчивость, которая существенно ограничивает характеристики пучка в конечном эксперименте и, в результате приводит к уменьшению светимости в коллайдере.

Глава 3. Регулирование критической энергии методом резонансной вариации дисперсионной функции

Эта глава посвящена общим подходам при проектировании резонансной структуры с варьируемой критической энергией. Также рассматривается адаптации структуры коллайдера NICA с поднятой критической энергией выше конечной энергии эксперимента для возможности осуществления столкновения легких поляризованных пучков протонов и дейtronов на SPD детекторе.

Как было показано в Главе 1, структура коллайдера NICA проектировалась как дуальная для работы в двух модах: для экспериментов с тяжелыми ионами $^{79}\text{Au}_{197}$ и для экспериментов с поляризованными протонами и дейтронами \mathbf{p}, \mathbf{d} . В этом случае проблем с прохождением критической энергии не возникает, что было изначально учтено при проектировании. Однако, спроектированная и построенная регулярная структура, выбранная для тяжелоионной программы имеет фиксированное значение критической энергии и является характеристикой конкретной установки, то есть не отличается для разного сорта частиц. Характер поведения тяжелых ионов и легких частиц, существенно отличается с точки зрения внутрипучкового рассеяния. Для протонного пучка с интенсивностью 1×10^{12} время внутрипучкового нагрева возрастает примерно в 10 раз по сравнению с пучками ионов золота с интенсивностью 2.2×10^9 . Поэтому критическая энергия может подниматься за счет вариации дисперсии без опасения влияния внутрипучкового рассеяния. За счет резонансной модуляции дисперсионной функции коэффициент диффузии для внутрипучкового рассеяния возрастает в 2-3 раза, что не критично как при охлаждении протонов во время накопления, так и при их группировке на энергию эксперимента.

Как было показано в Главе 2, при прохождении через критическую энергию γ_{tr} развивается продольная неустойчивость для интенсивных сгустков. Пороговый ток ее развития $I_{\text{th}} \sim \eta$ пропорционален коэффициенту расширения орбиты, который стремится к нулю в первом приближении при $\gamma = \gamma_{\text{tr}} = 7.1$. Темп ускорения протонов при прохождении через критическую энергию при использовании индукционного ускорения в станции ВЧ1 составляет $\frac{dy}{dt} = 0.2c^{-1}$. Этот темп слишком мал, чтобы полностью избежать развития неустойчивости при приближении релятивистского фактора к γ_{tr} . Чтобы исключить при ускорении протонов прохождение через критическую энергию, для протонной моды

должна быть реализована новая оптическая структура колец вместо оптической структуры тяжелоионной моды. В этой оптической структуре критическая энергия должна быть выше максимальной энергии протонов при работе коллайдера на эксперимент.

Максимальная магнитная жесткость поворотных магнитов постоянна $R_{\text{arc}} \cdot B_{\text{bend}} = \frac{A \cdot m c \gamma \beta}{e Z} \approx 45$. В силу того, что отношения массы к заряду $(A/Z)_p = 1/1 = 1$, для ионов золота $(A/Z)_{\text{Au}} = 197/79 = 2.2$. Тем самым, определяется максимально возможная энергия для протонов $E_{\max}^p = 12.4$ ГэВ ($\gamma_p = 14.3$), следовательно критическая энергия должна быть не менее ($\gamma_{\text{tr}} = 15 - 16$), что заведомо выше критической энергии для ионной регулярной структуры $E_{\text{tr}}^{\text{Au}} = 5.7$ ГэВ ($\gamma_{\text{tr}}^{\text{Au}} = 7.1$).

В данной главе будут приведен краткое теоретическое обоснование применения метода резонансной структуры. Теоретический метод был развит в работе [14], а его применение для современных ускорительных установок рассмотрено в работе [15]. Изучена возможность адаптации регулярной магнитооптической структуры главного кольца NICA к резонансной. А также анализ полученной структуры с точки зрения компенсации нелинейных эффектов, компенсации хроматичности и динамической апертуре.

3.1 Введение суперпериодической модуляции

Здесь будет приведено кратное теоретическое обоснование метода резонансных структур, применяемых для обеспечения вариации критической энергии. Исходя из уравнения 1.3 коэффициент расширения орбиты α зависит как от дисперсионной функции $D(s)$, так и радиуса кривизны орбиты $\rho(s)$, таким образом вариация критической энергии может быть достигнута путем введения независимой модуляции обеих функций.

Уравнение для дисперсионной функции с бипериодической переменной фокусировкой описывает поведение с учётом влияния градиентов в квадрупольных линзах, а также радиуса кривизны орбиты [14]

$$\frac{d^2 D}{ds^2} + [K(s) + \varepsilon k(s)] D = \frac{1}{\rho(s)}, \quad (3.1)$$

где $K(s) = \frac{e}{p}G(s)$, $\varepsilon k(s) = \frac{e}{p}\Delta G(s)$, $G(s)$ – градиент магнитооптических линз, $\Delta G(s)$ – суперпериодическая модуляция градиента, $p = \beta\gamma m_0 c$ – импульс частицы. Суперпериод определяется как совокупность нескольких периодов. Функция $K(s)$ имеет периодичность одного периода фокусирующей ячейки L_c , $k(s)$ и $\rho(s)$ имеет периодичность суперпериода $L_s = n \cdot L_c$.

Разложение в ряд Фурье для зеркального суперпериода может быть осуществлено только по косинусам

$$\varepsilon k(\varphi) = \sum_{k=0}^{\infty} g_k \cos(k\varphi) \quad (3.2)$$

где $\varphi = \frac{2\pi}{L_s}s$ – угловая продольная координата, k -ая гармоника:

$$g_k = \frac{1}{B\bar{R}} \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Delta G \cos k\varphi d\varphi, \quad (3.3)$$

где $B\bar{R}$ – магнитная жесткость.

Радиус кривизны орбиты также может быть разложен в ряд Фурье по косинусам

$$\frac{1}{\rho(\varphi)} = \frac{1}{\bar{R}} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_n \cos n\varphi \right), \quad (3.4)$$

где n -ая гармоника

$$r_n = \frac{\bar{R}}{\pi} \int_{\pi}^{-\pi} \frac{\cos n\varphi}{\rho(\varphi)} d\varphi. \quad (3.5)$$

Полученные разложения могут быть подставлены в уравнение 3.1, из которого получено необходимое точное решение для дисперсионной функции $D(s)$. Таким образом, окончательно для коэффициента уплотнения орбиты одного суперпериода получено выражение в общем виде, разложенное до второго порядка

$$\begin{aligned} \alpha_s = & \frac{1}{\nu^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{R}}{\nu} \right)^4 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{g_k^2}{(1 - kS/\nu) [1 - (1 - kS/\nu)^2]^2} + \right. \\ & + \frac{1}{4} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{r_k^2}{1 - kS/\nu} - \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{R}}{\nu} \right)^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{r_k g_k}{(1 - kS/\nu) [1 - (1 - kS/\nu)^2]} - \\ & \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{R}}{\nu} \right)^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{r_k g_k}{1 - (1 - kS/\nu)^2} + O(g_k^i, r_k^j, i + j \geq 3) \right\}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где \bar{R}_{arc} – усредненное значение кривизны, $\nu = \nu_x$ – количество горизонтальных бетатронных колебаний на длине арке, S – количество суперпериодов на длине арки. В случае отсутствия суперпериодической модуляции и модуляции кривизны орбиты $g_k = 0, r_n = 0 \forall k, n$, формула 3.6 принимает вид $\alpha_s = \frac{1}{\gamma_{\text{tr}}^2} = \frac{1}{\nu_x^2}$, что соответствует случаю регулярной структуры и наглядно видно, что $\gamma_{\text{tr}} \sim \nu_x$. Для поднятия критической энергии необходимо уменьшить коэффициент $\alpha_s = \frac{1}{\gamma_{\text{tr}}^2}$, а значит выражение под знаком суммы в ур. 3.6 должно быть отрицательным. Это реализуемо при условии $kS/\nu_x > 1$, когда осуществлена либо модуляция градиентов квадрупольей $g_k \neq 0$, либо радиуса $r_n \neq 0$.

Ранее все формулы были приведены для суперпериода, а не для всего кольца коллайдера. Введение прямых участков уменьшает степень модуляции дисперсионной функции. Усреднение дисперсии по более длинной орбите автоматически уменьшает ее значение, а значит уменьшает коэффициент уплотнения орбиты для всего ускорителя, результирующее значение критической энергии $\gamma_{\text{tr}}^{\text{total}}$ увеличивается и определяется выражением:

$$\gamma_{\text{tr}}^{\text{total}} = \gamma_{\text{tr}}^{\text{arc}} \sqrt{\frac{S \cdot L_s + L_{\text{str}}}{S \cdot L_s}}. \quad (3.7)$$

где L_s – длина суперпериода, L_{str} – длина бесдисперсионных прямых секций.

3.2 Построение резонансной структуры на основе ячеек ФОДО, ФДО, ОДФДО

Исходя из уравнения 3.6, в случае отсутствия модуляции кривизны орбиты $r_n = 0, \forall n$ для одного суперпериода в первом приближении (при $k = 1$) коэффициент расширения орбиты приобретает вид

$$\alpha_s = \frac{1}{\nu^2} \left\{ 1 + \frac{1}{4(1 - kS/\nu)} \left(\frac{\bar{R}}{\nu} \right)^4 \frac{g_k^2}{[1 - (1 - kS/\nu)^2]^2} \right\}. \quad (3.8)$$

Таким образом, доступным средством вариации критической энергии, является только модуляция градиента квадрупольных линз по длине суперпериода. Однаковые элементы, расположенные в различных местах арки объединяют в одно семейство. На рис. 3.1 изображен один суперпериод, который состоит

из 3-х ФОДО ячеек, с двумя семействами фокусирующих квадрупольей (QF1 и QF2) и одним семейством дефокусирующих (QD).

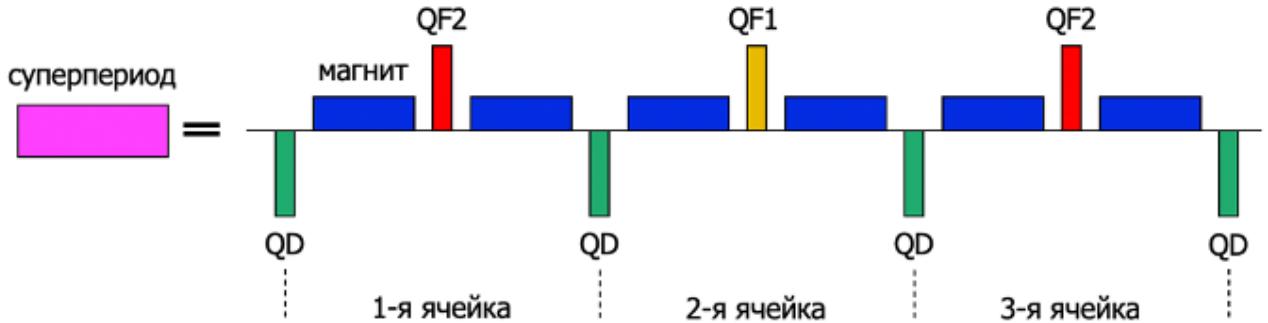


Рисунок 3.1 — Суперпериод, состоящий из 3-х ФОДО ячеек. QF1, QF2 – фокусирующие квадруполя, QD – дефокусирующие квадруполя, В – поворотный магнит.

Суперпериод может быть образован на основе синглетных ФОДО ячейках, дублетных ФДО ячейках, а также триплетных ОДФДО (рис.3.2 а,б,в). Рассмотрим структуры поворотных арок на 180 градусов без модуляции кривизны (рис.3.2 г, д, е), образованных из соответствующих ячеек. Из полученных суперпериодов также образуется резонансная магнитооптическая структура путем только модуляции градиента (рис.3.2 ж, з, и). Резонансная структура образуется путем вариации параметров регулярной структуры.

Качественное отличие в пространственном распределении Твисс-параметров β_x , β_y , D_x является ключевым для соответствующей оптимизации структуры. Как видно из приведенных структур, суперпериод, основанный на синглетных ФОДО ячейках может иметь ряд преимуществ.

Хроматичность зависит от величины градиентов в квадруполях, секступолях, а также местах их расположения [8]

$$\begin{aligned} C_x &= -\frac{1}{4\pi} \oint \beta_x [K_x(s) - S(s)D(s)] ds \\ C_y &= -\frac{1}{4\pi} \oint \beta_z [K_y(s) + S(s)D(s)] ds, \end{aligned} \quad (3.9)$$

Отсюда видно, что, во-первых, для подавления хроматических эффектов в ФОДО-ячейке, требуются меньшие градиенты в секступольных линзах. Во-вторых, более простой способ коррекции и тонкой настройки набега бетатронных

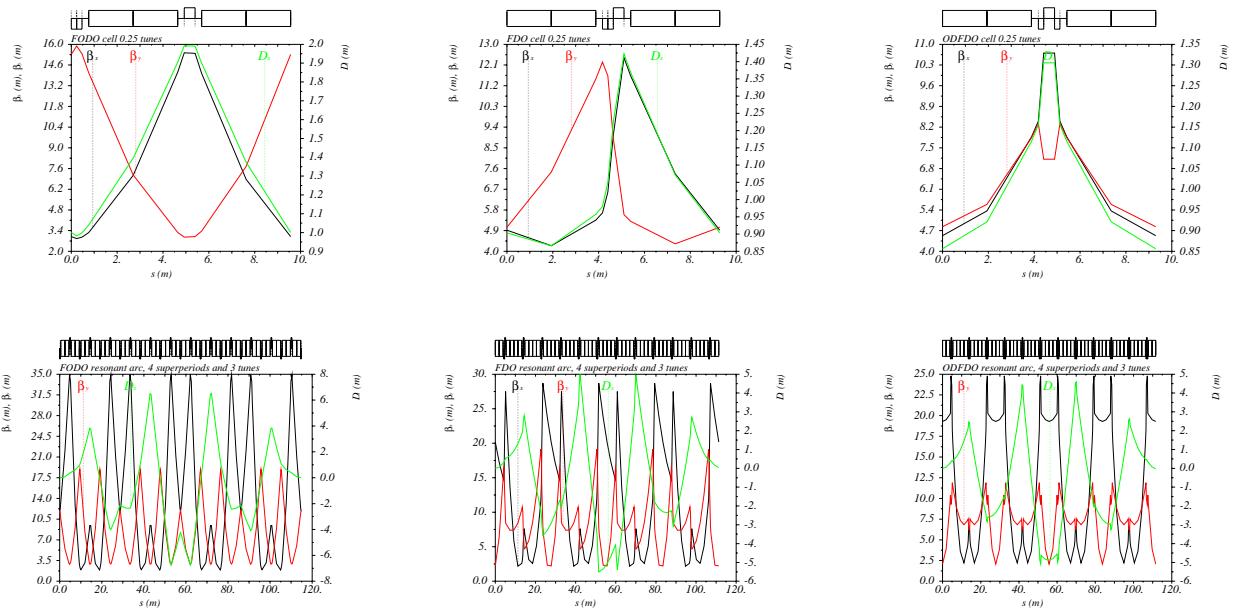


Рисунок 3.2 — Твисс-параметры $\beta_{x,y}$, D_x . Сверху – для ячеек для сигнлетной ФОДО, дублетной ФДО, триплетной ОДФДО ячеек; посередине – регулярная структура; снизу – резонансная.

частот в обеих плоскостях, а также коэффициента расширения орбиты. Таким образом, является более предпочтительной по сравнению с аналогичными.

3.3 Регулярная ФОДО структура с суперпериодической модуляцией градиентов линз

Поскольку квадрупольная фокусирующая структура поворотных арок коллайдера NICA состоит из ФОДО ячеек, рассмотрим возможность адаптации регулярной структуры к резонансной. На рис. 3.3 приведены 3 ФОДО ячейки, первая – используется в регулярной тяжелоионной структуре, в этом случае модуляция отсутствует, вторая – модулированная структура, которая и образует один суперпериод. В обоих случаях частота бетатронных колебаний $\nu_{x,y}$ $s = 0.75$, таким образом для 4-х суперпериодов частота $\nu_{x,y}$ arc = 3, что удовлетворяет ранее рассмотренному условию $S = 4, \nu_x = 3$.

Глубина модуляции определяется соотношением градиентов двух различных фокусирующих семейств. Для приведенного на правом рисунке рис. 3.3 $G_{QF1} = 27.7$ Т/м, $G_{QF2} = 21.0$ Т/м. Таким образом глубина модуляции:

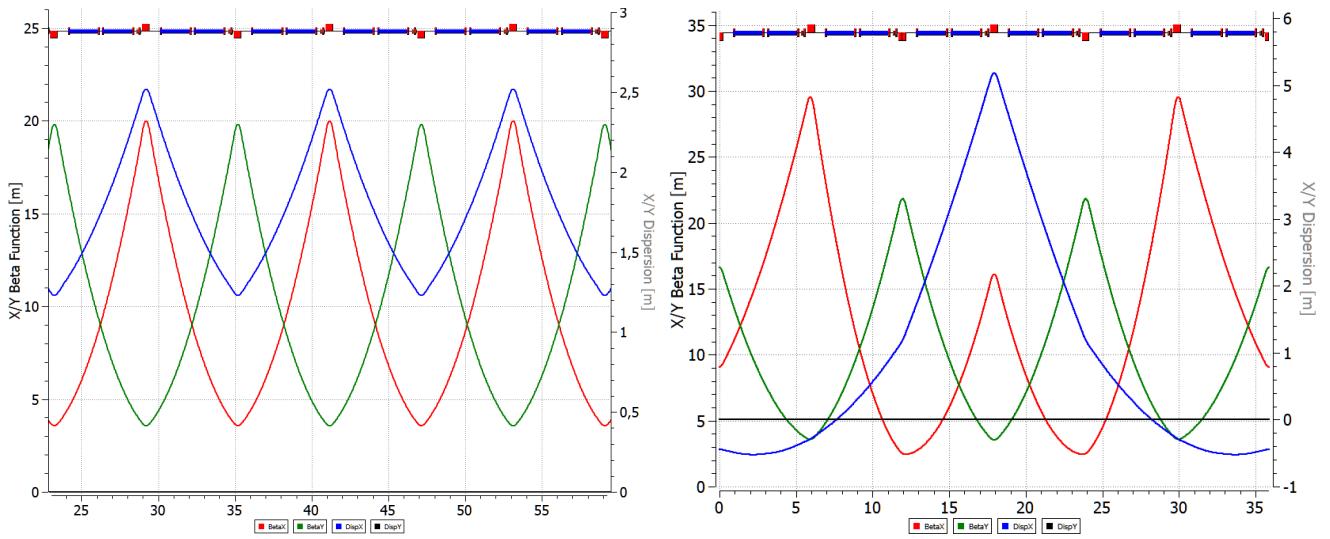


Рисунок 3.3 – Твисс-параметры 3-х ячеек. Слева – регулярная структура без модуляции, справа – модулированная с введением суперпериодичности, глубина модуляции 24%.

$$H = \frac{G_{QF1} - G_{QF2}}{G_{QF1}} = 24\% \quad (3.10)$$

Первая гармоника является определяющей и для 12 ФОДО ячеек реализуемо условие $S = 4$, $\nu_x = 3$, где 3 ФОДО ячейки объединены в один суперпериод. Таким образом, благодаря набегу бетатронных колебаний кратному 2π , в нашем случае 6π , арка имеет свойства ахромата первого порядка. Благодаря этому свойству может быть подавлена дисперсия без дополнительных усилий.

Для арки, составленной из 4-х одинаковых суперпериодов с критической энергией на арке $\gamma_{tr}^{arc} = 10$, по формуле 3.7 для всего кольца получаем $\gamma_{tot}^{arc} \approx 15.9$. Однако, конечная арка будет нерегулярной в силу необходимости подавления дисперсии на краях арки, а значит в конкретном реальном случае значение критической энергии будет несколько отличаться.

3.4 Подавление дисперсии на краях поворотных арок

Важным требованием при проектировании магнитооптической структуры является обеспечение нулевого значения дисперсии на прямых участках для обеспечения движения частиц вдоль равновесной орбиты на этих участках. Это условие легко реализуется при подавлении дисперсии и её производной на концах поворотной арки. Рассматривается 4 варианта подавления дисперсии:

1. Полностью регулярная арка. Регулярная арка состоящая из 4-х одинаковых суперпериодов. При набеге фазы на арке кратному 2π подавление дисперсии происходит в силу регулярности;
2. Регулярная арка с применением методики отсутствующих магнитов на двух крайних ячейках арки, что показано на рис. 3.4.
3. В структуре с отсутствующими магнитами при переходе к резонансной оптике, подавление дисперсии возможно при помощи крайних суперпериодов. В этому случае при набеге фазы на арке не кратному 2π необходимо дополнительно добавить подавители дисперсии на краях арки, а именно двух крайних ФОДО ячеек. Две крайние ФОДО ячейки отличаются наличием и в этих ячейках квадруполи QFE1 и QFE2 также имеют отличные градиенты от основных квадруполей арки и подбираются таким образом, чтобы подавить дисперсию.
4. В структуре с отсутствующими магнитами при переходе к резонансной оптике, также возможно подавление дисперсии всей аркой, при помощи выбора градиентов квадруполей двух семейств. Этот случай отличается тем, что все квадруполи арки принадлежат первому, либо второму семейству и подавление дисперсии также обеспечивается только 2-мя семействами.

Дефокусирующие же квадруполи во всех случаях принадлежат только одному семейству QD. Рассмотрим представленные случаи более подробно.

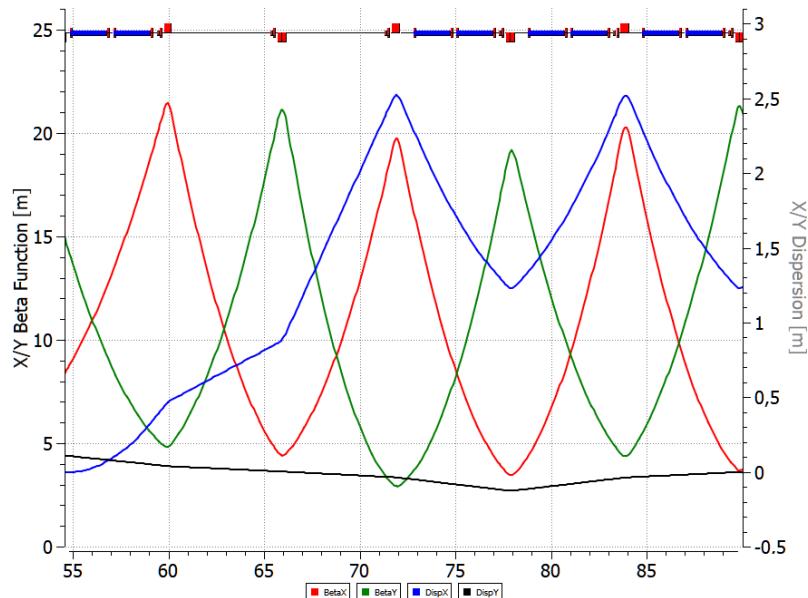


Рисунок 3.4 — Подавление дисперсии в тяжелоионной структуре.

3.4.1 Полностью регулярная магнитооптическая структура

Требование подавления дисперсии легко реализуемо в случае создания регулярных поворотных арок, составленных из одинаковых суперпериодов. В этом случае, обеспечив нулевое значение дисперсии $D = 0$ (а также производной дисперсии $D' = 0$) на входе в арку, в силу регулярности на выходе из арке также будут нулевые значения дисперсии и её производной, а следовательно и на всем прямом участке. Однако, учитывая особенность структуры коллайдера NICA, наличие отсутствующих магнитов на двух крайних ячейках не дает возможность создать полностью регулярную арку из 4-х одинаковых суперпериодов.

3.4.2 Подавление дисперсии при помощи крайних суперпериодов

В этому случае выбор значения градиентов квадрупольей арки определяется двумя факторами: а) получение необходимого значения критической энергии на всем кольце коллайдера, что соответствует $\gamma_{tr} \sim 15 - 16$; б) обеспечение количество бетатронных колебаний на арке $n_{arc} = 3$ в обоих плоскостях, тем самым удовлетворив резонансному условию при количестве суперпериодов $S = 4$. Исходя из этих условий модулируем суперпериод с набегом фазы на суперпериоде $n_s = 0.75$ в обоих плоскостях.

Коллайдер также состоит из 2-х арок и 2-х прямых участках, соединяющих арки. В центре прямых участков имеются точки столкновения, где нужно обеспечить малое значение бета-функции для достижения требуемой светимости. В крайнем суперпериоде применяется метод отсутствующих магнитов в 2-х ячейках, тем самым делая арки коллайдера не регулярными и возникает необходимость подавления дисперсии на прямых участках при помощи введения 2-х дополнительных семейств квадрупольей QFE1 и QFE2 на краю арки, параметры Твисса изображены на рис. 3.6. В результате значение критической энергии подобрано таким образом, что $\gamma_{tr} = 15.6$, а количество колебаний на арке: $n_{x, arc} = 3.01$, $n_{y, arc} = 3.01$.

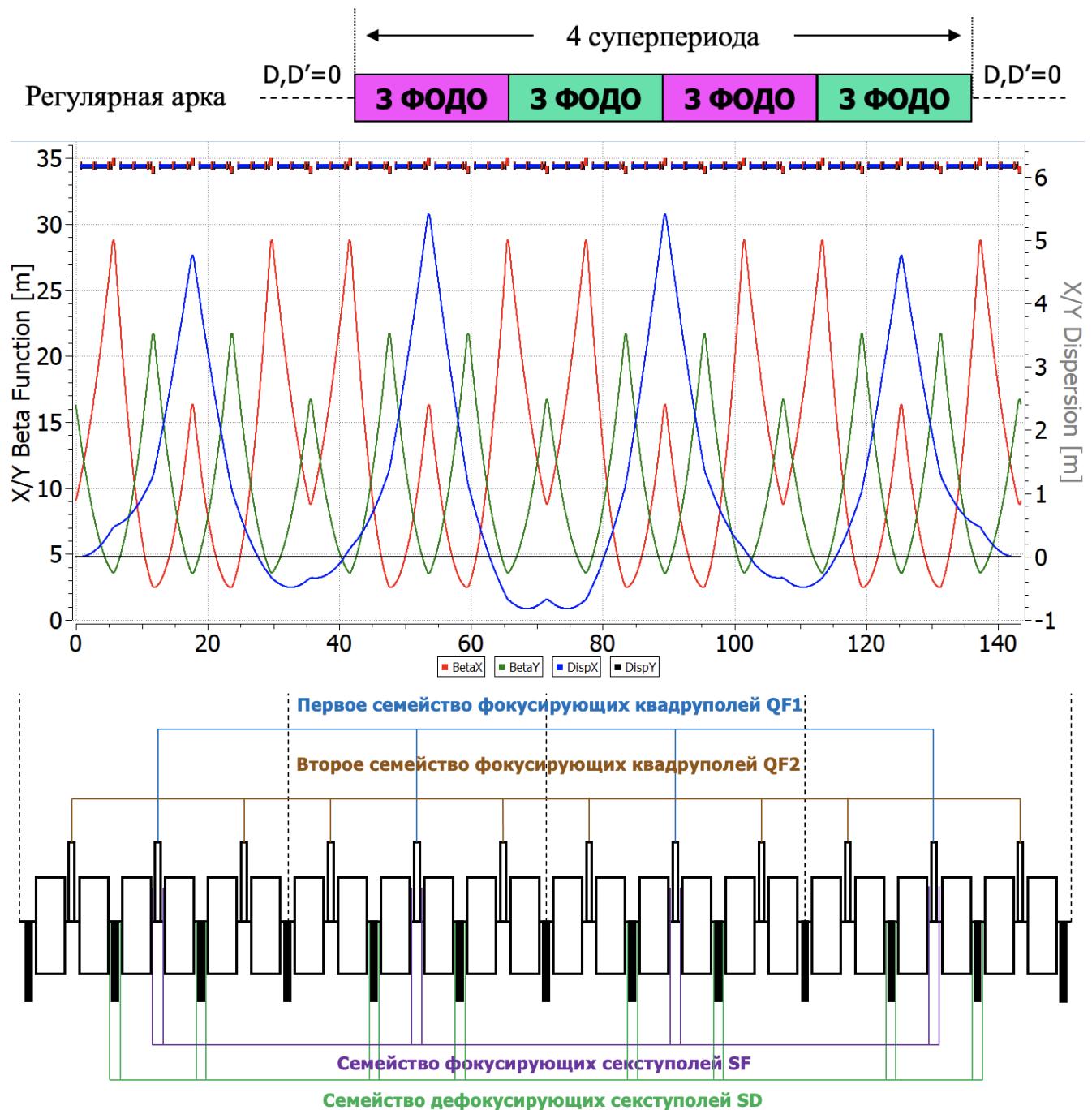


Рисунок 3.5 — Подавление дисперсии в регулярной структуре.

3.4.3 Подавление дисперсии всей аркой, при помощи выбора градиентов квадруполей двух семейств.

Данный способ показывает возможность подавления дисперсии на прямых участках при помощи только двух семейств фокусирующих квадруполей. Тут важно учесть, как и в первом случае выполнить: а) получение необходимого значения критической энергии на всем кольце коллайдера, что соответствует

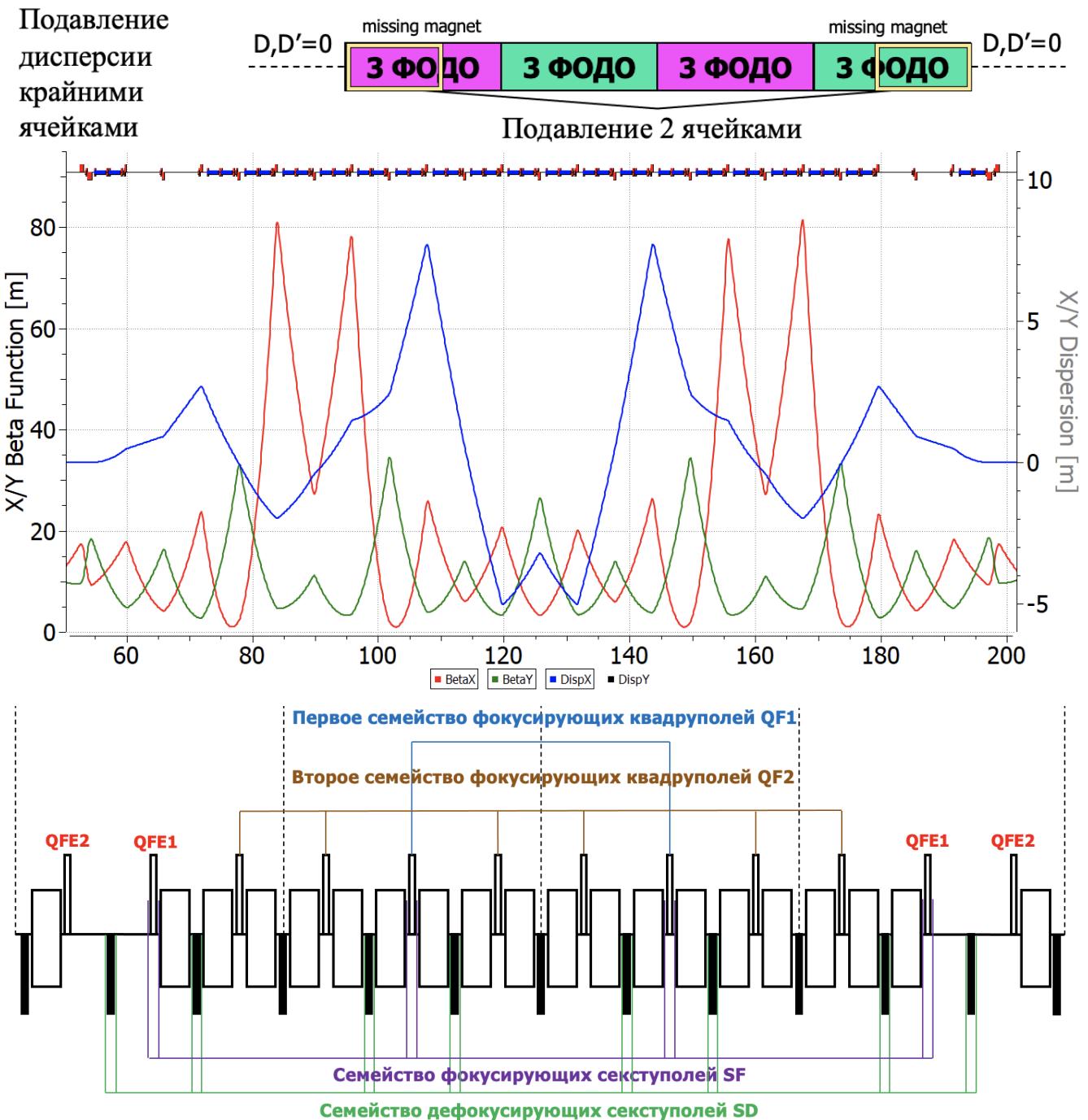


Рисунок 3.6 – Подавление дисперсии в тяжелоионной структуре.

$\gamma_{tr} \sim 15 - 16$; б) только при помощи квадруполями двух семейств подавить дисперсию на прямых участках.

Изначально выбирается суперпериод, как и в первом случае с набегом на суперпериоде $\nu_s = 0.75$. Тем самым получаем значения квадрупольей QF1 и QF2 для всей арки, в том числе и на краях. Однако, получается, что дисперсия на прямых участках оказывается не подавленной. Для подавления значения градиентов квадрупольей изменяется, но в таком случае набег фазы на арке становится равен $\nu_x, \text{arc} = 2.72178$, $\nu_y, \text{arc} = 2.99884$, то есть в x-плоскости не

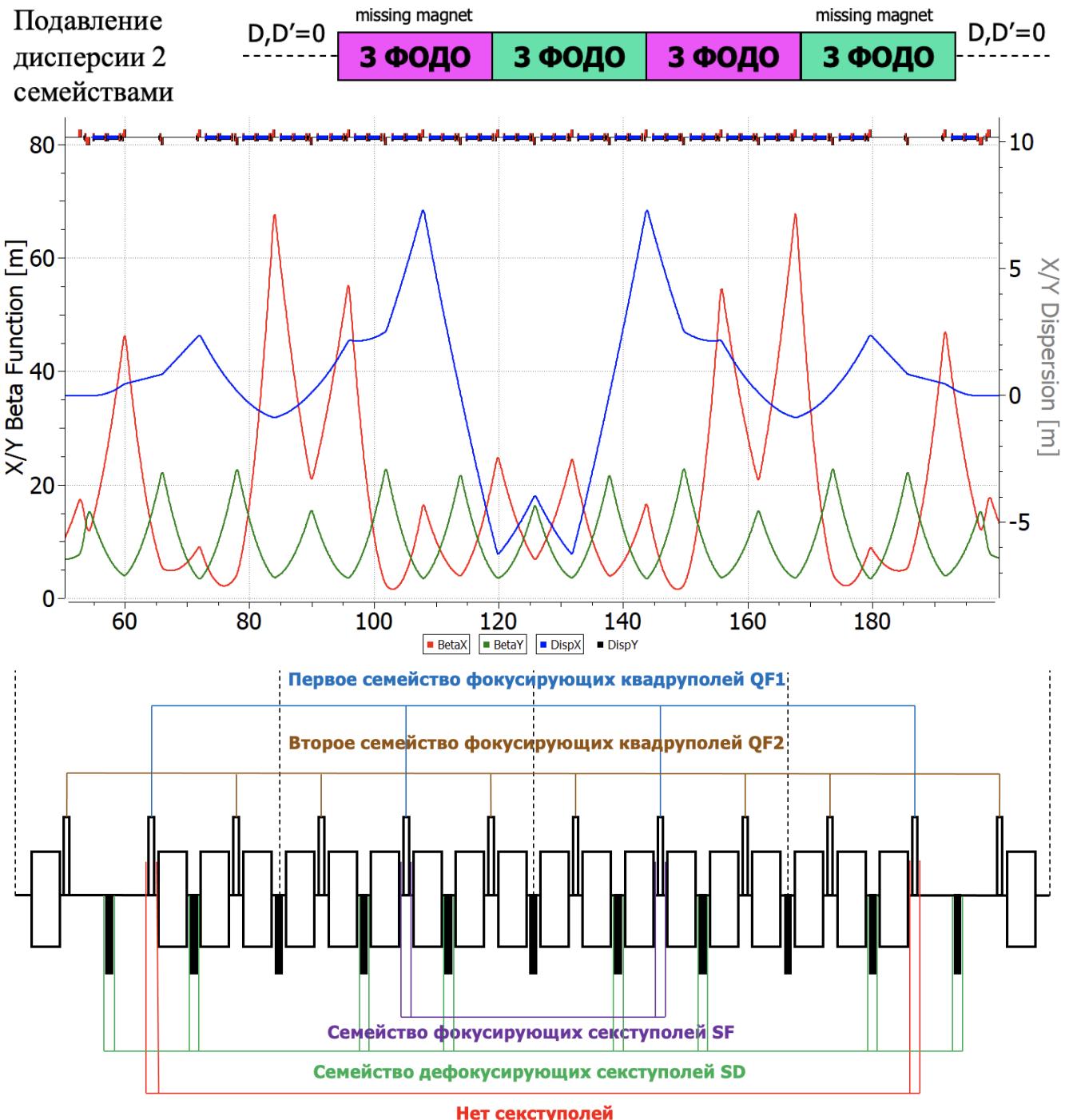


Рисунок 3.7 — Подавление дисперсии в тяжелоионной структуре.

кратен 2π . В этом случае для достижения требуемого значения критической энергии необходимо обеспечить большую модуляцию градиентов квадрупольей, чем в случае подавления дисперсии крайними суперпериодами. Принципиальная схема показана на рис. 3.9. Для полученной нерегулярной арки значение критической энергии $\gamma_{tr}^{arc} = 10$.

3.5 Исследование динамической апертуры в синхротроне с учетом требуемой модуляции дисперсионной функции для повышения критической энергии

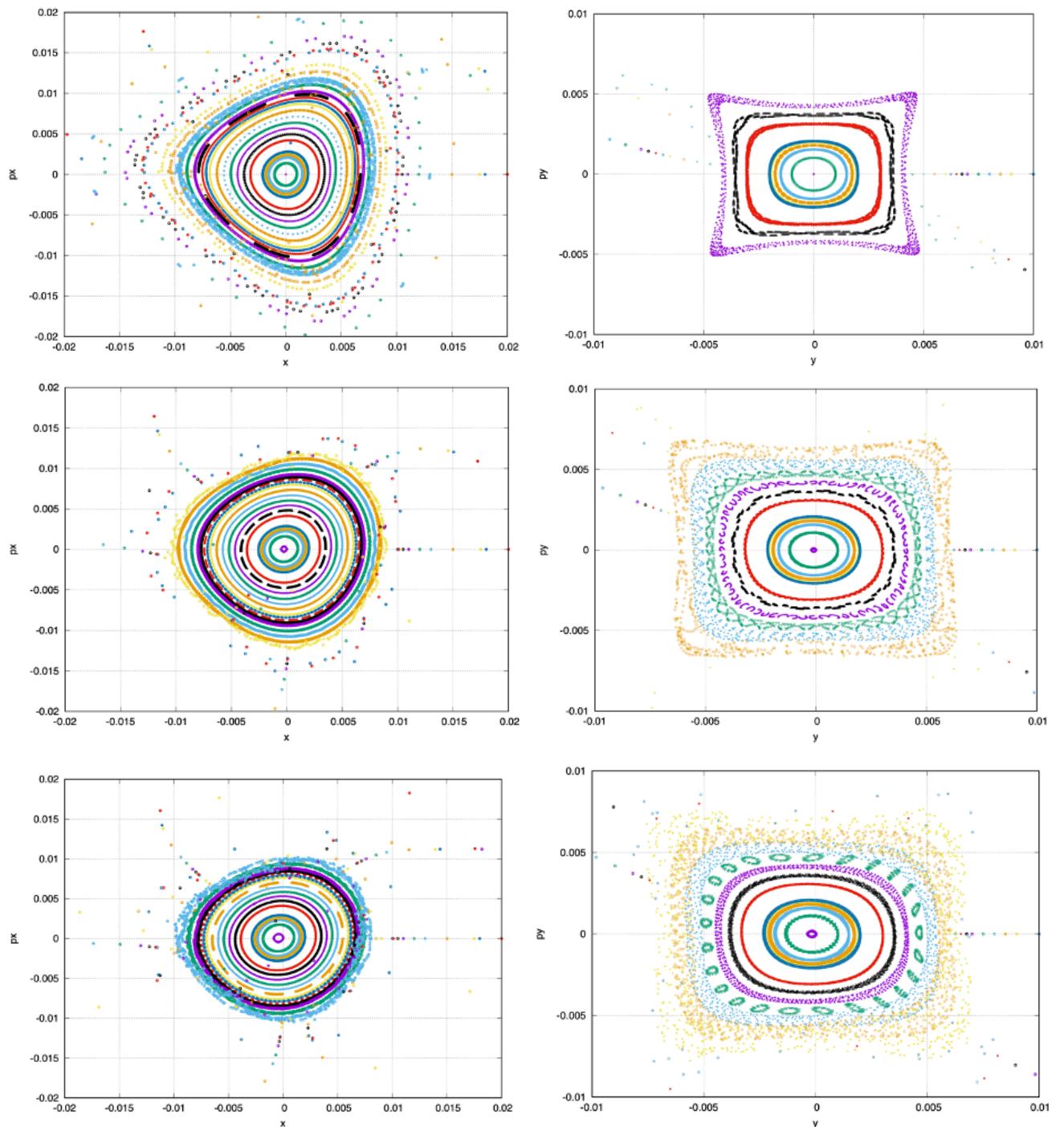


Рисунок 3.8 — Динамическая апертура для случая плавления дисперсии крайними квадрупольями. Слева — x-плоскость; справа — y-плоскость.

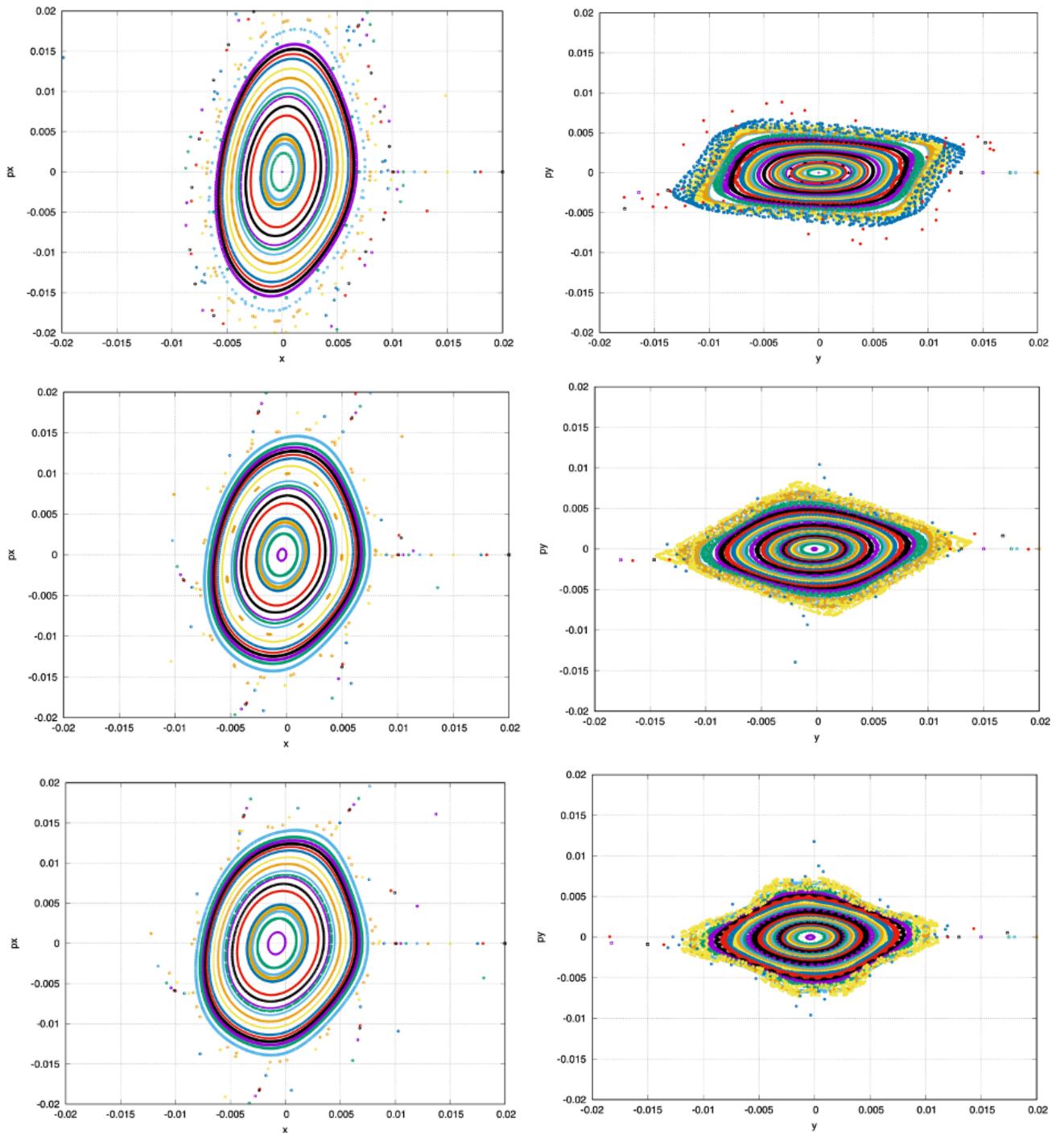


Рисунок 3.9 — Динамическая апертура в случае подавление дисперсии двумя семействами квадрупольей. Слева – x-плоскость; справа – y-плоскость.

Выбор нечетного значения частоты на арке $\nu_x, \text{arc} = 3$ и четного значения суперпериодичности арки $S = 4$ замечателен еще и тем, что позволяет компенсировать нелинейный вклад секступолей внутри арки. Добавление секступолей, подавляющих хроматичность внутри арки делает арку ахроматом второго порядка, что убирает зависимость бетатронных колебаний от импульса и способствует сохранению динамической апертуры в большом диапазоне

энергий. В этом случае набег фазы радиальных колебаний между ячейками, расположенными в разных половинках арки и разделенных $S/2$ числом суперпериодов равен:

$$2\pi \cdot \frac{v_{\text{arc}}}{S_{\text{arc}}} \cdot \frac{S_{\text{arc}}}{2} = 2\pi \cdot \frac{v_{\text{arc}}}{2} = \pi + 2\pi n, \quad (3.11)$$

что соответствует условию компенсации нелинейного влияния секступолей в первом приближении во всей арке. Это замечательное свойство также относится к высшим мультиполям в квадрупольях и отклоняющих магнитах. Эта связь через число суперпериодов $S_{\text{arc}}/2$ называется длинной связью.

Выводы

Рассмотрена методика вариации критической энергии методом модуляции градиента квадрупольных линз на арках. Такой случай предполагает раздельное питание квадрупольей. Также учтена необходимость подавления дисперсии на краях арки в имеющейся структуре и подавление хроматичности на всем кольце коллайдера. Исследования выполнены в применении к ускорительному комплексу NICA, однако без потери общности, может применяться на различных установках.

1. Введение модуляции дисперсионной функции или радиуса кривизны орбиты приводит к вариации коэффициента уплотнения орбиты и как следствие критической энергии установки. Таким образом можно добиться повышенной критической энергии, выше энергии эксперимента, и также достижения комплексного значения;
2. Рассмотрены схемы подавления дисперсионной функции в резонансной структуре на краях поворотных арок. В случае полностью регулярной структуре это достигается путем выбора кратного набега фазы. При использовании метода отсутствующих магнитов ('missing magnet'), регулярность нарушается и возможно подавление как крайними ячейками, так и только двумя семействами квадрупольей;
3. Исследовано влияние нелинейных эффектов на динамическую апертуру в резонансной структуре. Для различных вариаций магнитооптики предложены оптимальные схемы расположения секступолей.

Глава 4. Возможности изучения ЭДМ легких поляризованных пучков заряженных частиц

Известная проблема физики состоит в объяснении барионной асимметрии, то есть наблюдаемым преобладанием материи над антиматерией. До сих пор, существующие физические законы не способны полностью объяснить такой дисбаланс. В работе 1967 год А. Д. Сахаровым были сформулированы общие необходимые условия для наличия барионной асимметрии: 1) Нарушение закона сохранения барионного заряда; 2) Нарушение С- и СР-симметрии; 3) Нарушение на ранних этапах формирования Вселенной термодинамического равновесия [23]. Согласно второму условию, "*Возникновение С-асимметрии по нашей гипотезе является следствием нарушения СР-инвариантности при нестационарных процессах расширения горячей Вселенной на сверхплотной стадии, которое проявляется в эффекте различия парциальных вероятностей зарядово-сопряженных реакций*". Ранее в 1958 году С. Окубо теоретически показал такой эффект при рассмотрении распада сигма гиперона Σ^+ и его античастицы $\bar{\Sigma}^+$. Позднее в 1964 году Д. Кронин и В. Фитч экспериментально обнаружили нарушение СР-инвариантности слабого взаимодействия в процессах распада нейтральных каонов K_2^0 на два пиона π^+, π^- [69], за что в 1980 году были удостоены нобелевской премии по физике.

В современной Стандартной модели частиц Р- [70] и СР-симметрии нарушаются. Источником СР-нарушения является наличие комплексной фазы в матрице смешивания夸克ов Кабибо-Кабаяси-Маскава для слабых взаимодействий [71] и коэффициента θ_{QCD} в лагранжиане квантовой хромодинамики [72], однако не обнаружено СР-нарушений в сильных взаимодействиях. Согласно СРТ-теореме, СР-инвариантность эквивалентна Т-инвариантности. Источником такого нарушения может являться ненулевой электрический дипольный момент (ЭДМ) элементарных частиц, фундаментальное свойство материи и обусловленное неоднородностью распределения заряда внутри частицы. Поскольку ЭДМ представляется полярным вектором, а не псевдовектором, то для него нарушается как Р-, так и Т-инвариантность, что показано на Рис. 4.1. Величина ЭДМ в Стандартной Модели слишком мала для экспериментального детектирования и находится на уровне $|d_n| < 10^{-30} - 10^{-32} e \cdot \text{см}$ для нейтрона [73]. Возможность его существования была сформулирована в заметке 1950 Перселл

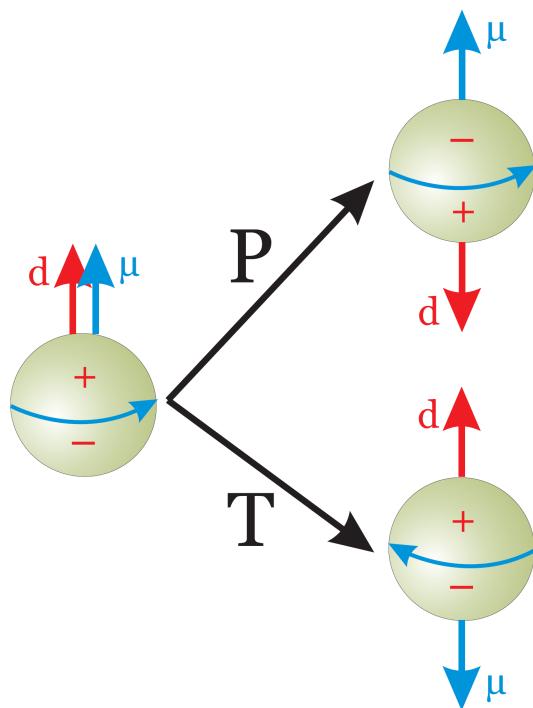


Рисунок 4.1 — Схематическое изображение нарушение Р- и Т-симметрии ненулевым электрическим дипольным моментом.

и Рэмси [74], однако ненулевое ЭДМ пока точно не обнаружено. Другие теоретические модели, такие как Суперсимметричные (SUSY), также предсказывают наличие ЭДМ, но на уровне $|d_n| < 10^{-27} - 10^{-29} \text{ e} \cdot \text{см}$ для нейтрона, которые оставляют существенную надежду на экспериментальное обнаружение. Стоит отметить, что и таких точностей пока достигнуто не было, а сделаны только существенные ограничения для нейтрального нейтрона, впервые появившиеся в работе Н. Рамси и его коллег $|d_n| < 5 \times 10^{-20} \text{ e} \cdot \text{см}$ (90% C.L.) [75], текущее ограничение находится на уровне $|d_n| < 1.8 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{см}$ (90% C.L.), что получено в работе nEDM [76].

Изучение ЭДМ нейтрона, а также нейтральных атомов удобно сохранением их положения при действии внешних магнитных и электрических полей. В случае заряженных частиц происходит движение, согласно силе Лоренца, что и приводит к необходимости применения ускорительных установок, позволяющих длительное накопление пучка с заданными параметрами и выступающих в роли накопительного кольца. Наиболее интересными и перспективными направлениями выглядит изучение ЭДМ протона и дейтрона.

Обнаружение ЭДМ-эффекта может быть осуществлено по изучению поведения спина во внешних электромагнитных полях. Важным является отличие свойства индивидуальной частицы — спина и пучка — поляризации. Возмож-

ность изучения спина ансамбля частиц определяется теоремой Эренфеста [77] и состоит в том, что уравнения для средних значений квантовых наблюдаемых величин формально тождественны уравнениям классической механики, если все величины заменить на соответствующие средние значения. Применение этой теоремы к чисто квантовой величине – спин, позволяет оперировать понятием – поляризации пучка, где усреднение может осуществляться как по количеству частиц, так и по оборотам. Классическое уравнение описывающее эволюцию вектора спина было получено Телегди, Баргманн, Мишель в 1959 году [21], с учётом одноименной прецессии Томаса. Вращение осуществляется за счёт наличия как магнитного дипольного момента (МДМ), так и ЭДМ

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{S}}{dt} &= \left(\vec{\Omega}_{\text{MDM}} + \vec{\Omega}_{\text{EDM}} \right) \times \vec{S}, \\ \vec{\Omega}_{\text{MDM}} &= -\frac{q}{m\gamma} \left\{ (\gamma G + 1) \vec{B}_\perp + (G + 1) \vec{B}_\parallel - \left(\gamma G + \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right\}, \\ \vec{\Omega}_{\text{EDM}} &= -\frac{q}{2m} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} - \frac{\gamma}{\gamma + 1} \frac{\vec{\beta}}{c} (\vec{\beta} \cdot \vec{E}) \right), \quad G = \frac{g - 2}{2}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $\vec{\Omega}_{\text{MDM}}, \vec{\Omega}_{\text{EDM}}$ – угловые частоты обусловленные наличием МДМ и ЭДМ; q, m, G – заряд, масса и магнитная аномалия; β – нормализованная скорость; γ – Лоренц-фактор; $d = \eta \frac{q}{2mc} s$ – ЭДМ фактор, s – спин. Уравнение содержит 2 слагаемых, одно обусловлено наличием МДМ, другое – ЭДМ соответственно [78]. Главным образом, ЭДМ пропорционален силе Лоренца, которая отлична от нуля в элементах с ненулевой кривизной и равняется нулю на прямых участках.

Для непосредственного измерения ЭДМ-компоненты, влияние МДМ на спин должно быть нивелировано. Это может быть достигнуто, во-первых, полным занулением МДМ-члена в каждой точке кольца, такой метод получил название *замороженный спин* (*frozen spin*). Либо интегрально, когда элементы одного типа последовательно компенсируются другого, такой подход получил название *квази-замороженный спин* (*quasi-frozen spin*) [25].

На сегодняшний день исследование поляризованных пучков заряженных частиц велось в нескольких ускорительных центрах [79]. Первоначально, с мюонами на эксперименте $g - 2$ в Брукхейвенской Национальной Лаборатории в США (BNL, USA) [80]. Позднее, в 2004 году изложена идея измерения дейтрана с использованием метода замороженного спина коллаборацией srEDM, также

в БНЛ [24]. Предлагалось измерение увеличения абсолютного значения вертикальной компоненты поляризации. В 2008 году, исследования проводились в накопительном кольце COSY (COoler SYnchrotron) в Исследовательском центре “Юлих” (Forschungszentrum Jülich GmbH, Германия) [24].

Новым крупным центром станет комплекс ОИЯИ NICA-Nuclotron в городе Дубна, Россия, с возможностью всестороннего изучения спиновой физики. В том числе уже упомянутое изучение ЭДМ заряженных частиц, коллайдерные эксперименты с симметричными и асимметричными пучками с целью изучения проблемы "спинового кризиса" [22], а также поиск аксиона [26]. В данной главе будут рассмотрены способы создания квази-замороженного спина в периодических структурах и возможность их реализации. Кроме того, будет измерен не абсолютный рост вертикальной компоненты, а частота, что получило название метод частотной области (frequency domain method) [81].

Помимо, рассмотренного в Главах 1-3, коллайдера NICA, в ускорительный комплекс также входит установка Nuclotron [4]. Данный синхротрон предназначен как для самостоятельных экспериментов на выведенной мишени BM@N и изучения управления поляризацией, так и для использования в качестве инжектора поляризованного пучка протонов и дейтронов в коллайдер NICA. Однако, установка была введена в эксплуатацию в 90-е годы [82] и может быть модернизирована с использованием новых современных магнитооптических элементов, производимых непосредственно в ОИЯИ г. Дубна [83]. Для расширения возможностей Nuclotron в качестве самостоятельной машины рассматривается возможность изучения ЭДМ легких заряженных частиц. Такие прецизионные эксперименты возможны на ускорителе, работающем в режиме накопительного кольца с целью долгого удержания сгустка на орбите и накоплению достаточной статистики эксперимента.

Возможность исследования ЭДМ с применением метода квази-замороженного спина возможна также и на установке, изначально для этого не предназначеннай. Однако, поскольку для компенсации влияния МДМ необходимо использование элементов с электрическим полем, требуется дополнительное место для их расположение. Такое может быть достигнуто путем введения обводных каналов. Это возможно в том числе в кольце коллайдера NICA.

В экспериментах по измерению ЭДМ ключевым является обеспечение высокого показателя времени когерентности (SCT — Spin Coherence Time) порядка 1000 секунд, что было получено в кольце COSY [84]. В течение такого времени

когерентный поляризованный пучок удерживается на орбите. Таким образом, для моделирования структуры с возможностью исследования ЭДМ необходимо гарантировать стабильность спиновой динамики вдоль всего кольца, что является отдельной задачей, наравне с обеспечением орбитальной стабильности пучка.

4.1 Орбитальная и спиновая динамика в электромагнитных полях

Рассмотрим как орбитальное, так и спиновое движение в электромагнитных полях в обобщенном виде. Для орбитального вращения в поперечном магнитном поле согласно уравнению Лоренца

$$qc\vec{\beta} \times \vec{B}_\perp = \vec{\Omega}_p^B \times \vec{p}, \quad (4.2)$$

где q – заряд, c – скорость света, $\vec{\beta}$ – вектор относительной скорости, \vec{B}_\perp – поперечное магнитное поле, \vec{p} – импульс частицы, $\vec{\Omega}_p^B$ – вектор угловой скорости (индексы означают, что происходит вращение импульса в магнитном поле). Учтем, что импульс частицы представим в виде $\vec{p} = \gamma mc\vec{\beta}$, тогда ур. 4.2а с учетом перестановки векторного произведения получаем

$$qc\vec{\beta} \times \vec{B}_\perp = -mc\gamma\vec{\beta} \times \vec{\Omega}_p^B, \quad (4.3)$$

для угловой скорости

$$\vec{\Omega}_p^B = -\frac{q}{m\gamma}\vec{B}_\perp. \quad (4.4)$$

Для заряженной частицы в электростатическом дефлекторе, выполняющего функцию поворота всегда соблюдается условие $\vec{p} \perp \vec{E}$, тогда происходит движение по окружности (рис. 4.2б) и аналогично ур. 4.2

$$q\vec{E}_\perp = \vec{\Omega}_p^E \times \vec{p}, \quad (4.5)$$

где \vec{E}_\perp – электростатическое поле перпендикулярное импульсу, $\vec{\Omega}_p^E$ – вектор угловой скорости (индексы означают, что происходит вращение импульса в электростатическом поле)

$$q\vec{E}_\perp = mc\gamma\vec{\Omega}_p^E \times \vec{\beta}. \quad (4.6)$$

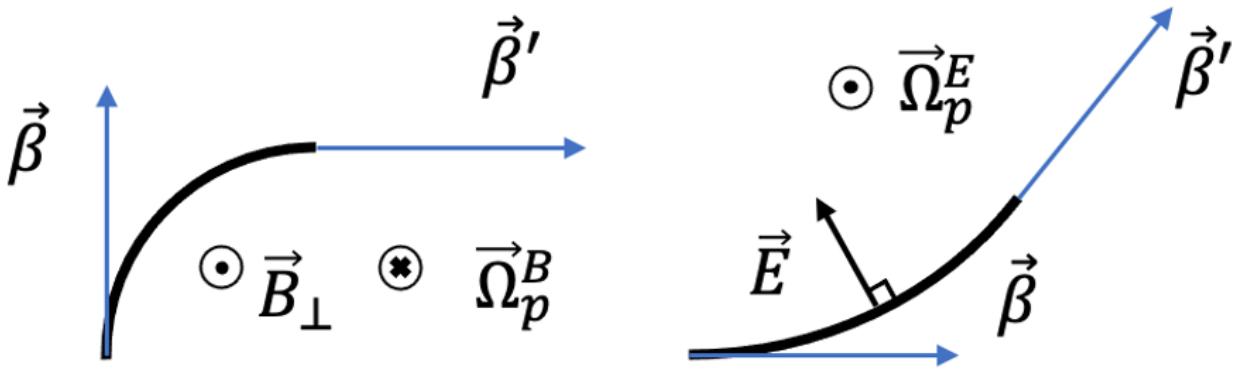


Рисунок 4.2 — Вращение положительно заряженной частицы а) в магнитном поле; б) электростатическом поле.

Для угловой скорости с учётом векторного произведения $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$, $\vec{\omega} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{(r, \vec{r})}$

$$\vec{\Omega}_p^E = \frac{q}{mc} \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}_\perp}{\gamma(\vec{\beta}, \vec{\beta})} = \frac{q}{m\gamma} \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}_\perp}{c\beta^2} \quad (4.7)$$

Рассмотрим теперь вращение спинового вектора под действием МДМ, описываемого уравнением Т-БМТ 4.1 относительно вектора импульса

$$\vec{\omega}_p^B = \vec{\Omega}_{MDM}^B - \vec{\Omega}_p^B = -\frac{q}{m\gamma} (\gamma G + 1) \vec{B}_\perp + \frac{q}{m\gamma} \vec{B}_\perp = -\frac{q}{m} G \vec{B}_\perp. \quad (4.8)$$

Величина ν_s^B – *спин-тюн* (*spin-tune*) является скалярной величиной и отражает во сколько раз поворот вектора спина больше поворота вектора импульса

$$\nu_s^B = \frac{|\vec{\Omega}_{MDM}^B - \vec{\Omega}_p^B|}{|\vec{\Omega}_p^B|} = \frac{-\frac{q}{m} G |\vec{B}|_\perp}{-\frac{q}{m\gamma} |\vec{B}_\perp|} = \gamma G. \quad (4.9)$$

Аналогично для вращения в электростатическом поле

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_p^E &= \vec{\Omega}_{MDM}^E - \vec{\Omega}_p^E = \frac{q}{m} \left(G + \frac{1}{\gamma + 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} - \frac{q}{mc} \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{\gamma \beta^2} = \\ &= \frac{q}{mc} \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Спин-тюн в электростатическом поле

$$\nu_s^E = \frac{|\vec{\Omega}_{MDM}^E - \vec{\Omega}_p^E|}{|\vec{\Omega}_p^E|} = \frac{\frac{q}{mc} \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) |\vec{\beta} \times \vec{E}|}{\frac{q}{mc} \frac{|\vec{\beta} \times \vec{E}|}{\gamma \beta^2}} = \gamma \beta^2 \left(G - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right). \quad (4.11)$$

Примечательно, что спин-тюн как в магнитном поле ур. 4.9, так и электростатическом ур. 4.11 не зависит от величины поля в дефлекторе, а определяется энергией и аномальным магнитным моментом.

4.2 Общий концепт квази-замороженной структуры

Сформулируем концепцию квази-замороженной структуры в общем смысле. Перейдем от рассмотрения общего случая вращения спина в магнитном и электрическом поле к непосредственным элементам и поворотным аркам. Первым условием является сохранение конфигурацию замкнутой орбиты, при этом орбитальная траектория остается неизменной от оборота к обороту. Для периодической структуры это условие может быть сформулировано как

$$\Phi_p^{\text{arc}} + \Phi_p^{\text{comp}} = \frac{2\pi}{N} \quad (4.12)$$

где индекс p – указывает на импульс, Φ_p^{arc} и Φ_p^{comp} – суммарное вращение импульса в поворотной арке и компенсаторе спинового вращения, N - периодичность структуры. Для создания накопительного кольца, подходящего как для изучения ЭДМ, так и исследований на более высокой энергии, важно использовать чисто магнитную арку с поперечным ведущим полем, учитывая ограничения максимальной достижимой напряженности электростатического поля. В этом случае используется отдельный соответствующий спиновый компенсатор, который не возмущает орбиту. Окончательно, данные утверждения могут быть сформулированы как $\Phi_p^{\text{arc}} = \frac{2\pi}{N}$ и тогда $\Phi_p^{\text{comp}} = 0$. Для того, чтобы эффективная сила Лоренца равнялась нулю в спиновом компенсаторе, должно быть использовано как электрическое, так и магнитное поле. Из уравнения 4.12 для углов вращения справедливо

$$\Phi_{pB}^{\text{comp}} + \Phi_{pE}^{\text{comp}} = 0, \quad (4.13)$$

где Φ_{pB}^{comp} и Φ_{pE}^{comp} – суммарное вращение в магнитном и электрическом полях спинового компенсатора. Из уравнения 4.1 видно, что максимальная эффективность электростатического поля достигается при радиальном направлении по

отношению к вектору импульса. Кроме того, такое поле также эффективно для орбитального вращения, что следует из ур. 4.7.

Второе условие для реализации квази-замороженной структуры – компенсация МДМ-вращения на одном периоде кольца

$$\Phi_s^{\text{arc}} + \Phi_s^{\text{comp}} = 0, \quad (4.14)$$

где Φ_s^{arc} and Φ_s^{comp} – суммарное вращение спина в поворотной арке и спиновом компенсаторе. Компенсация осуществляется благодаря фундаментальному различию вращения в магнитном и электрическом поле. Используя соотношения из ур. 4.9, 4.11, получаем уравнения связи для углов в чисто магнитном поле поворотной арки $\Phi_s^{\text{arc}} = v_{B\perp} \Phi_p^{\text{arc}}$ и магнитном $\Phi_{sB}^{\text{comp}} = v_{B\perp} \Phi_{pB}^{\text{comp}}$ и электрическом $\Phi_{sE}^{\text{comp}} = v_E \Phi_{pE}^{\text{comp}}$ в спиновом компенсаторе. Тогда, для ур. 4.14

$$\begin{aligned} v_{B\perp} \Phi_p^{\text{arc}} + (v_{B\perp} \Phi_{pB}^{\text{comp}} + v_E \Phi_{pE}^{\text{comp}}) &= \\ = v_{B\perp} (\Phi_p^{\text{arc}} + \Phi_{pB}^{\text{comp}}) + v_E \Phi_{pE}^{\text{comp}} &= 0. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Окончательно, согласно первому и второму условию квази-замороженного спина, для угла вращения в магнитном или электрическом поле в компенсаторе МДМ-вращения

$$\Phi_{pE}^{\text{comp}} = -\Phi_{pB}^{\text{comp}} = \Phi_p^{\text{arc}} \frac{\gamma^2 G}{G + 1} = \frac{2\pi}{N} \frac{\gamma^2 G}{G + 1}. \quad (4.16)$$

Стоит отметить, что не было упомянуто о физической структуре компенсирующего элемента, а только об интегральных характеристиках представленных компонентов поля.

4.2.1 Эффективная длина элемента, компенсирующего МДМ-вращение

Эффективная длина компенсирующего элемента может быть рассчитана для магнитного и электрического полей

$$L = \Phi_{pB}^{\text{comp}} R_B = \Phi_{pE}^{\text{comp}} R_E \quad (4.17)$$

где R_B, R_E – радиус кривизны магнитного и электрического поля. Для комбинированного элемента, результирующий радиус может быть найден как

Радиус кривизны элемента с электрическим и магнитным полем может быть найден как

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_E}, \quad R_B = \frac{B\rho}{B}, \quad R_E = \frac{\kappa}{E}, \quad (4.18)$$

где $B\rho = \frac{p_0}{e}$ – магнитная жесткость, $p_0 = \gamma m\beta c$, $\kappa = \frac{p_0\beta c}{e}$ – электрическая жесткость. Поскольку для фильтра Вина $R = \infty$, то и радиусы кривизны связаны $R_B = -R_E$. И для выбора радиуса достаточно определить либо магнитное поле, либо электрическое. Более строгое ограничение дается на электрическое поле $E_{\max} = 10 - 13$ МВ/м [85]. Для минимальной длины в периодической структуре, из ур. 4.16, 4.17

$$L_{\min} = \Phi_{pE}^{\text{comp}} R_E = \frac{2\pi}{N} \frac{\gamma^2 G}{G+1} \frac{\kappa}{E_{\max}} = \frac{2\pi}{N} \frac{G}{G+1} \frac{mc^2}{e} \frac{\gamma(\gamma^2 - 1)}{E_{\max}}. \quad (4.19)$$

4.3 Определение оптимальной энергии эксперимента

Как видно из Т-БМТ уравнения, зависимость от энергии пучка является определяющей для проведения эксперимента. Эксперимент по исследованию ЭДМ не требует специального детектора, необходимо только наличие поляриметра с достаточной анализирующей способностью. Такое устройство измеряет асимметрию рассеяния на образце. Это требование устанавливает энергию эксперимента и определяется потребностями поляриметрии. Для протона, наибольшее сечение рассеяния на углеродной мишени находится при энергии пучка 270 МэВ и 135 МэВ/нуклон для дейтрона [86; 87]. Изменение конечной энергии эксперимента приводит к снижению анализирующей способности поляриметра и увеличивает естественное время измерения для достижения статистической значимости.

4.4 Влияние сорта частиц на особенности спиновой динамики

Из уравнений 4.9, 4.11 видно, что для спиновой динамики сорт частиц существенно влияет на вращение относительно импульса. Кроме того, различное соотношения заряда к массе также влияет на орбитальную динамику пучка.

В зависимости от сорта исследуемых частиц аномальный магнитный момент значительно отличается для протона $G_p = 1.79$ и дейтрона $G_d = -0.14$. Если рассмотреть вывод формул 4.16, 4.19, то всюду учитывалось, что введенные углы могут иметь как положительный, так и отрицательный знак. Таким образом уравнения могут быть использованы как для рассмотрения дейтрана, так и протона. Приведённые различия требуют применения индивидуальных подходов к каждому типу частиц при планировании экспериментов и анализе результатов.

В магнитном поле, направление вращения зависит исключительно от знака аномального магнитного момента и не зависит от энергии. Однако на величину относительного вращения влияют как энергия, так и абсолютное значение аномального магнитного момента. Для протонов этот эффект настолько важен, что вращение спина в поворотной арке должно быть ограничено $\gamma G \cdot \Phi_p^{\text{arc}} < \pi/2$, чтобы сохранить возможность накопления ЭДМ для продольно поляризованного пучка. Использование периодических структур может сохранить возможность измерения ЭДМ протона с помощью квази-замороженной структуры, периодичность которой должна составлять не менее $N = 8$.

Для того, чтобы оценить отличие измерения ЭДМ в квази-замороженной и замороженной структуре, в первом порядке используем коэффициентом [42]

$$J_0(\Phi_s^{\text{arc}}) = 1 - \frac{\Phi_s^{\text{arc}2}}{4}, \quad (4.20)$$

где Φ_s^{arc} представляет угол, связанный с МДМ-эффектом поворотной арки одного периода. Для различной периодичности частиц и структур в таблице 6 приведены основные параметры. Максимальная периодичность, рассматриваемая как $N = 16$, обусловлена сложностями проектирования структуры. Показано, что для дейтронов QFS решетки близка к FS. Для протонов 16-периодическая структура может предоставить реальную возможность практиковать методологию.

Таблица 6 — Значение угла магнитного поля и коэффициент отличия FS от QFS для разного сорта частиц и периодичности.

Частица	N	Φ_s^{arc} , deg	$J_0(\Phi_s^{\text{arc}})$
Дейtron d	2	-29.45	0.934
	4	-14.72	0.983
	8	-7.36	0.996
	16	-3.68	0.999
Протон p	8	103.83	0.179
	16	51.91	0.795

В электростатических полях поведение протонов и дейтронов еще больше усложняется из-за их отличного взаимодействия с полем. Для протонов направление вращения спина может зависеть от энергии, особенно в окрестности магической энергии, где $\gamma_{\text{mag}} = \sqrt{\frac{G_p + 1}{G_p}} = 1,248$ (233 МэВ). В любом случае, влияние электрического поля на протон намного ниже, чем на дейтроны, как показано на рис. 4.3. Для дейтронов не существует эквивалентной магической энергии, и их поведение при вращении со спином остается неизменным на всех уровнях энергии.

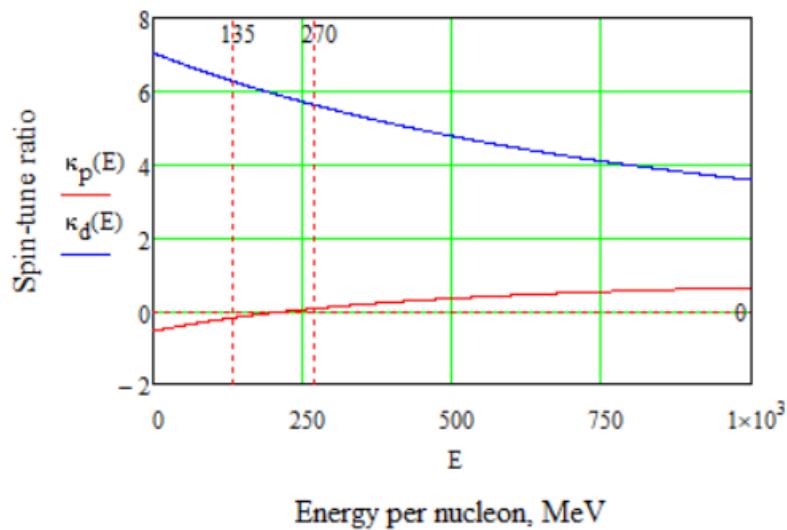


Рисунок 4.3 — Отношение спин-тюнов $\kappa = \frac{\nu_{B_\perp}}{\nu_E}$ поперечного магнитного и электрического поля для дейтрана и протона.

Эти фундаментальные различия приводят к нескольким важным выводам при построении структуры кольца. В частности, для изучения обоих типов

частиц необходимо специальным образом проектировать установку. Согласно уравнению 4.16 направление вращения для протона и дейтрана различается. Это указывает на необходимость смены полярности полей спинового компенсатора, либо поворота его на π вдоль продольной оси. Кроме того, минимально достижимая длина компенсатора определяемая уравнением 4.19, для протона больше, чем для дейтранов при оптимальной энергии поляриметра. Это несоответствие может быть устранено путем снижения экспериментальной энергии для протонов (рис. 4.4). При длине спинового компенсатора, эквивалентной той, которая используется для дейтранов, энергия протонов должна быть снижена до 73 МэВ, анализирующая способность уменьшается в 2-3 раза, что полезно для проработки методики исследования, но недостаточно для статистической проверки (таблица 7). Двумя приемлемыми подходами для создания дополнительных электромагнитных полей в роли спинового компенсатора является применение фильтра Вина или электростатического дефлектора с кикером, что будет рассмотрено далее.

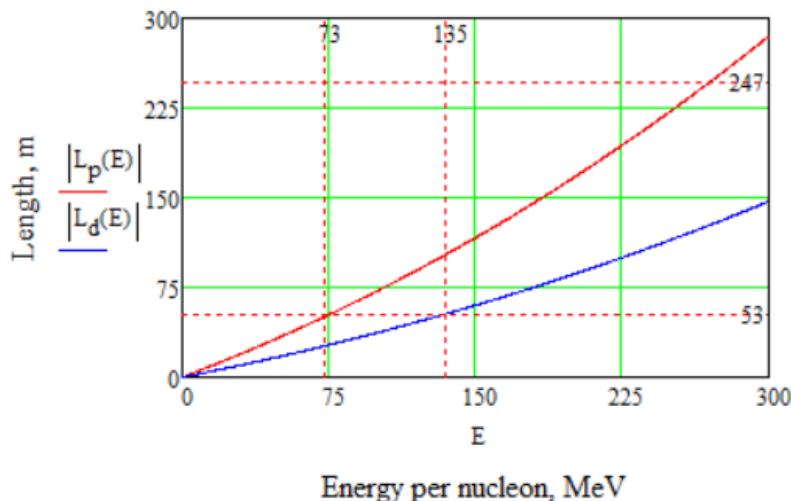


Рисунок 4.4 — Зависимость длины компенсирующего элемента в зависимости от энергии сгустка на нуклон.

Таблица 7 — Параметры частиц и эксперимента.

Частицы	A/Z	G	γ_{exp}	$E_{\text{exp}}, \text{МэВ/нуклон}$	$L, \text{м}$
Дейтрон d	2	-0.14	1.144	135	53
Протон p	1	1.79	1.289	270	247
			1.078	73	53

4.4.1 Применение прямого фильтра Вина со скрещенными полями

Фильтр Вина является важным инструментом в ускорителях частиц, предназначенным для манипуляции спиновой динамики без изменения орбитальной траектории частиц. Это достигается за счет использования перпендикулярных магнитного и электрического поля, которые компенсируют друг друга, что приводит также к компенсации силы Лоренца и не возмущает спин за счет ЭДМ. Такая конфигурация позволяет частицам двигаться по прямой линии, обеспечивая при этом компенсацию МДМ-эффекта, что делает фильтр идеальным для экспериментов, требующих манипуляций со спином. Конструкция фильтра гарантирует отсутствие чистого отклонения вдоль линии пучка, минимизируя дополнительные требования к пространству в прямых секциях кольца и предполагает классическое последовательное расположение элементов кольца.

На рис. 4.5 представлены принципиальные схемы квази-замороженного спина для дейтрона, так и для протона. Во-первых, показано, что отклонение спина за один период из-за МДМ-эффекта в магнитной арке значительно больше для протона. Во-вторых, направления полей для разного сорта частиц меняют знак.

Адаптивность фильтра Вина проявляется в возможности его использования как для дейтронов, так и для протонов; для дейтронов он может быть использован непосредственно на оптимальных энергиях, тогда как для протонов в той же структуре необходимо изменить полярность или повернуть установку на π вдоль продольной оси и использовать на более низких энергиях. Эта гибкость способствует разработке методологии для изучения спиновой динамики различных типов частиц, улучшая экспериментальные подходы. В целом, способность фильтра Вина управлять спином частиц без нарушения их орбиты, делает его перспективным элементом в современных прецизионных экспериментах.

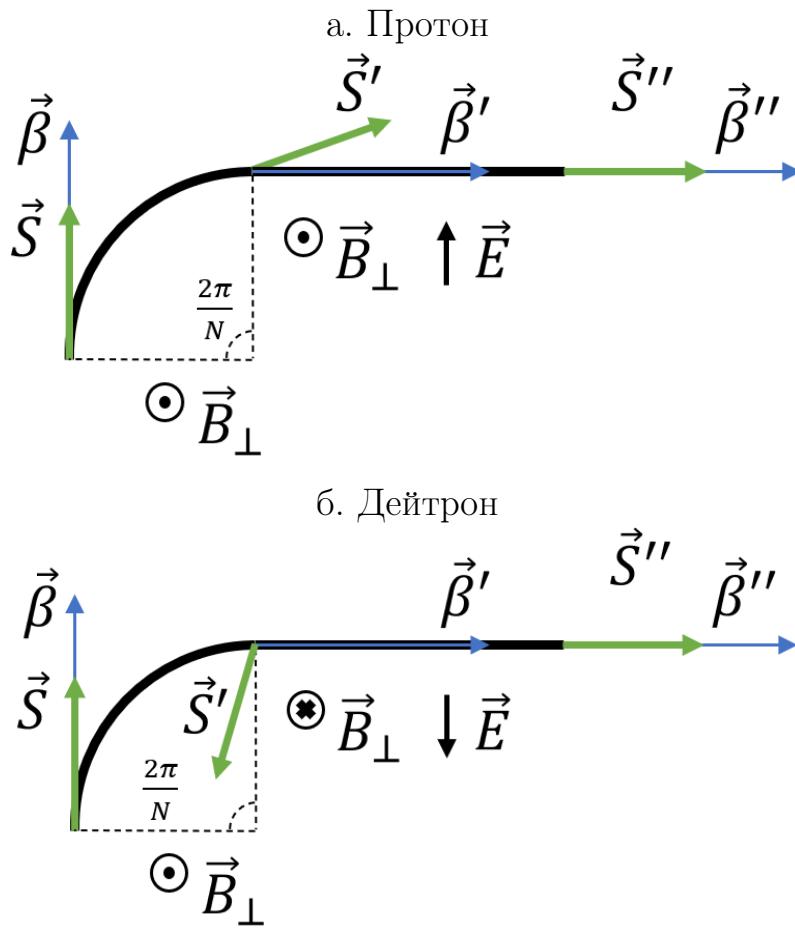


Рисунок 4.5 — Принципиальная схема одного периода квази-замороженной структуры с фильтрами Вина для а. дейтронов, б. протонов.

4.4.2 Применение электростатического дефлектора и дополнительного киккера

Чисто электростатический дефлектор предназначен для изменения как траекторий частиц, так и спиновой динамики, при этом создается радиальное электрическое поле с ненулевой кривизной. В отличие от фильтра Вина, дефлектор требует дополнительного киккера для компенсации орбитальных отклонений, что увеличивает общую длину спинового компенсатора.

При необходимости введения электростатической арки с кривизной Φ_{pE}^{def} , магнитные арки должны дополнительно поворачивать на угол Φ_{pB}^{kick} при помощи киккеров. Такой поворот будет впоследствии скомпенсирован поворотом в электростатической арке. На рис. 4.6а изображено поведения спин-вектора для дейтрона при последовательном действии магнитной арки, киккера, электростатической арки с отрицательной кривизной и симметрично расположенного

кикера. Для протона же меняется кривизна электростатической арки, а также дополнительных киккеров, а для измерений на полной энергии увеличивается и их эффективная длина, что показано на рис. 4.6б. Поворот импульса, после прохождения периода должен также быть повернут на $\frac{2\pi}{N}$ для обеспечения квази-замороженного условия.

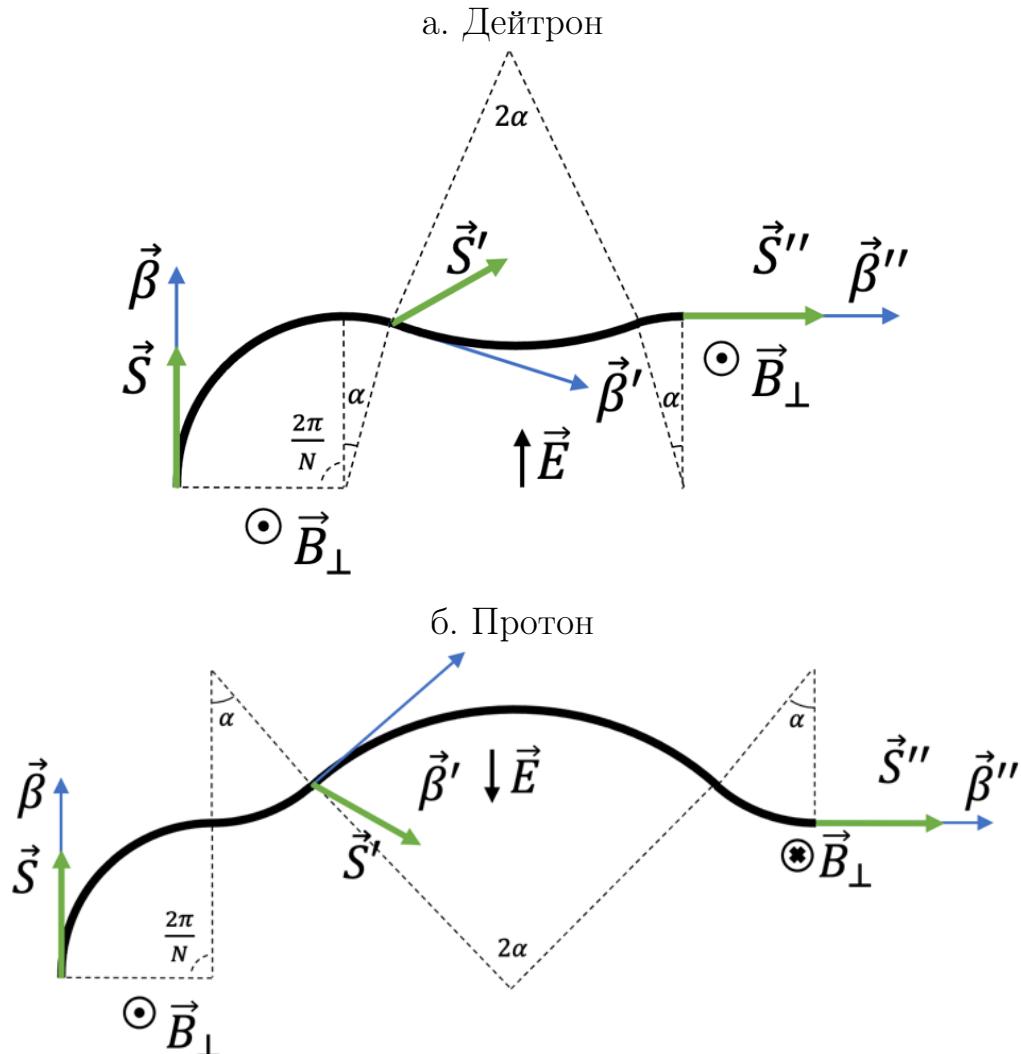


Рисунок 4.6 — Принципиальная схема одного периода квази-замороженной структуры с электростатическими дефлекторами для а. дейтронов, б. протонов.

Использование таких элементов особенно интересно для создания обходных секций в дополнение к исходным прямым секциям, позволяя варьировать структуру установки. Однако, необходимо учитывать расстояние между пространственным расположением оборудования, чтобы обеспечить возможность независимой работы. Основная сложность заключается в том, что для каждого типа частиц требуется различная кривизна, которую необходимо определить

на этапе проектирования структуры. Несмотря на эти сложности, электростатический дефлектор с киккером предлагает надежное решение для управления спином и траекторией частиц.

Такой результат говорит о том, что принципиальным для реализации квази-замороженности остается наличие отклоняющих полей. При использовании чисто электростатических дефлекторов, необходимо использовать дополнительный внешний магнитный толчок. В случае же прямого фильтра Вина используется скрещенные магнитное и электростатическое поля. Интегральная величина поля при этом сохраняется.

Как видно из рассмотренных принципиальных структур, изучение одновременно ЭДМ дейтрона и протона в структуре с электростатическими дефлекторами не целесообразно по сравнению со структурой с использованием фильтров Вина. Во-первых, требуемая длина дефлекторов равна длине фильтров Вина, но в первом случае необходимы дополнительные киккеры. Во-вторых, кривизна дефлекторов для протонов и дейtronов имеет различный знак. В тоже время, фильтры Вина устанавливаются на прямой участок и не требуют альтернативного канала. А для изучения протонов в фильтрах Вина может быть изменена полярность, либо сам элемент повернут на 180 градусов относительно продольной оси. Использование дефлекторов может быть полезно в случае естественной способности орбитально отклонять пучок, что позволяет создать альтернативный канал.

4.5 Применение концепции квази-замороженного спина в действующих ускорительных установках

В настоящее время предложенные энергетические требования для ЭДМ исследований установлены на уровне 270 МэВ и ниже, однако никаких ограничений относительно орбитального вращения в арке не сделано. Основным условием является достижения поворота импульса на определенный угол Φ_p^{arc} с соответствующим поворотом Φ_s^{arc} для спина. Это может быть достигнуто путем достаточного набора интеграла магнитного поля в диполях. Величина магнитного поля может быть произвольной, чтобы добиться максимальной эф-

фективности и минимизировать эффективную длину арки, поле должно быть максимально возможным, учитывая уникальные особенности структуры. Такой подход не только оптимизирует исследования на текущем уровне энергии, но и открывает возможности для других исследований поляризованных или неполяризованных пучков на более высоких энергиях, потенциально достигающих нескольких ГэВ. Универсальность квази-замороженной структуры позволяет внедрять её в различные установки, включая существующие ускорительные кольца, тем самым отвечая современным экспериментальным требованиям для работы на повышенных уровнях энергии. Применение изложенного подхода будет рассмотрено сразу для двух установок ОИЯИ: Nuclotron - являющимся бустером для коллайдера, так и самого коллайдера NICA.

4.6 Использование Nuclotron в качестве бустера легких поляризованных частиц в коллайдер NICA

Рассмотрим возможность использования синхротрона Nuclotron для ЭДМ исследований с применением концепции квази-замороженного спина.

В первую очередь, текущая структура Nuclotron предназначена для ускорения поляризованные протоны до энергии порядка 8 ГэВ с возможной последующей инжекцией в коллайдер NICA для экспериментов на SPD детекторе при энергии 12.6 ГэВ. Как было показано ранее в Главе 2, прохождение критической энергии без потерь в регулярной структуре коллайдера NICA при энергии 5.7 ГэВ для протонного поляризованного пучка является необходимым требованием эксперимента для достижения требуемой светимости. Таким образом, могут быть рассмотрены 2 вариации инжекции из бустера 1) ниже критической; 2) выше критической энергии коллайдера NICA. В первом случае, необходимо осуществить скачок критической энергии непосредственно в кольце коллайдера, что накладывают существенные ограничения на параметры пучка, в результате которых снижается светимость конечного эксперимента. Во втором случае, после инжекции необходимо охлаждение пучка при энергии 7-10 ГэВ. Однако, текущий электронный охладитель рассчитан на энергию пучка 2-3 ГэВ, что делает необходимым разработку новой установки электронного охлаждения на повышенной энергии.

Альтернативно, в Главе 3 был представлен вариант модернизации модернизация кольца NICA с повышенной критической энергией. При таком подходе проблем с прохождением критической энергии не возникает, поскольку во всем диапазоне энергий вплоть до конечной энергии эксперимента критическая энергия не преодолевается вовсе. В этом случае инжекция может осуществляться на энергии 2 – 3 ГэВ с эффективным электронным охлаждением на уже разработанной установке. Таким образом, максимальная энергия кольца Nuclotron может быть снижена без потери функции бустера.

4.6.1 Требования к магнитооптической структуре синхротронов NICA в задаче исследования электрического дипольного момента легких ядер

Окончательно, сформулируем ключевые требования, которые должны быть реализованы при модернизации кольца Nuclotron:

1. Использование Nuclotron в качестве бустера поляризованных частиц в коллайдер NICA при минимальной энергии протонного пучка 2-3 ГэВ;
2. Возможность проведения прецизионных экспериментов по исследованию ЭДМ заряженных частиц с использованием квази-замороженной концепции.

Текущая структура Nuclotron не предполагает проведения экспериментов по исследованию ЭДМ. Рассмотрим возможные способы реализации такой программы как на текущей установке, так и возможные опции по модернизации. В первую очередь, рассмотрим необходимые требования с точки зрения спиновой динамики. Основным является требование скомпенсированности МДМ компоненты. Для достижения этого эффекта может быть использован метод замороженного спина, в этом случае МДМ вращение равняется нулю для всего кольца. При таком подходе спин остается с всюду со-направлен с направлением импульса. Как можно увидеть из уравнений Т-БМТ и проведенного ранее анализа, необходимо использование элементов со скрещенными магнитными и электрическими полями. Наличие чисто магнитных арок приводит к невозможности использовать метод замороженного спина для компенсации МДМ вращения спина.

И как было показано, альтернативным является метод квази-замороженного спина, в отличие от замороженного спина предполагает пространственное разделение электрического и магнитных полей и последовательная компенсация МДМ-компоненты. Компенсация может быть осуществлена на прямых участках с необходимостью использовать электрическое поле. Для текущей опции могут быть рассмотрены как чисто электростатические дефлекторы, так и фильтры Вина с перпендикулярными электрическим и магнитным полем.

Стоит отметить, что поскольку Nuclotron должен быть использован в качестве бустера в NICA, то необходимо реализовать структуру,ирующую для ускорения поляризованного протонного пучка до энергии порядка единицы ГэВ, и одновременно с этим низкоэнергетическую опцию при энергии порядка сотен МэВ с возможностью изучения ЭДМ. Таким образом, ведущим полем должно выступать магнитное поле в поворотных магнитах, поскольку электрическое поле неспособно ускорить до энергии порядка единиц ГэВ. Кроме того, отдельное внимание будет уделено критической энергии Нуклотрона. Она должна лежать выше максимальной энергии пучка для сохранения его стабильности.

4.6.2 Текущая магнитооптика Nuclotron

Принципиальная схема текущей восьмипериодической структуры Nuclotron с длиной $L_{NUC} = 251$ м. представлена на рис. 4.7а. На рис. 4.8 изображены параметры Твисса для одного периода, неоптимальные с точки зрения подавления дисперсионной функции на прямых участках. Суммарная длина прямых промежутков составляет $L_{free} = 7 \times 8 = 56$ и в немодернизированной структуре Нуклотрона, расположение фильтров Вина с длиной $L_{WF} = 53$ м. полностью займёт всё пространство на прямых участках без возможности использования другого необходимого оборудования. Поэтому, рассмотрим возможность создания обходных каналов в исходной структуре. При таком подходе, оборудование можно расположить параллельно при наличии достаточного расстояния между полученными каналами. На рис. 4.7б показана принципиальная схема текущей структуры Nuclotron с электростатическими дефлекторами. Максимальное расстояние между каналами может составить порядка 18 см, чего недостаточно для параллельного расположения.

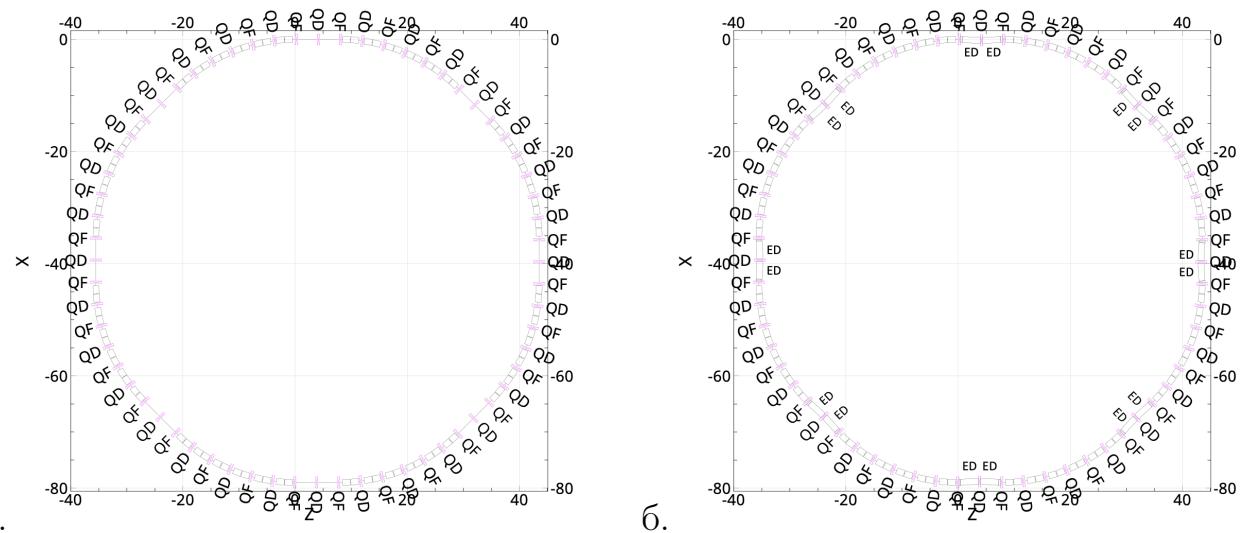


Рисунок 4.7 — Принципиальная схема расстановки структуры Nuclotron с текущей расстановкой элементов и с введением электростатических дефлекторов.

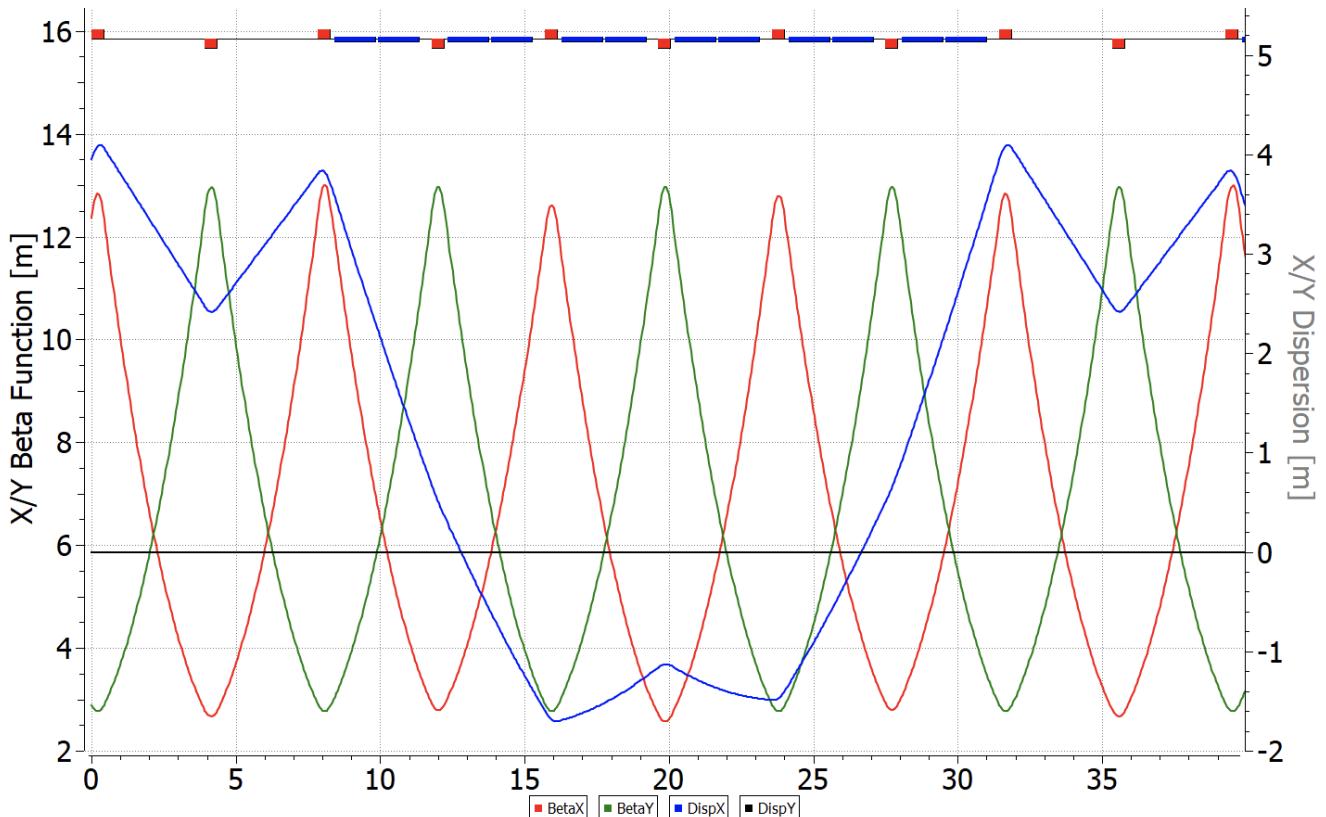


Рисунок 4.8 — Твист-функции текущей регулярной структуры Nuclotron.

Приведенные факты показывают необходимость модернизации для увеличения длины прямых участков, может быть рассмотрена модернизация с оптимизацией диполей с магнитным полем 1.8 Тл. Суммарная длина прямых промежутков должна составить $L_{\text{free}} + L_{\text{WLF}} = 56 + 53 = 109$ м. Оставшееся место будет использовано для расстановки магнитных элементов, диполей, квадрупольей, секступолей. Длина магнитной арки $L_{\text{arc}} = 17.5$ м, а длина магни-

тов изменяется от 1.44 м. до 1.78 м., при этом их количество сокращается вдвое с 96 до 48. Тогда максимальная энергия протонного пучка может максимально составлять 6.5 ГэВ. Данная опция, удовлетворяет требованию использования Nuclotron в качестве бустера при 2 – 3 ГэВ, а также возможности его использования на выведенной мишени экспериментов BM@N с понижением энергии от 10 ГэВ до 6.5 ГэВ [88]. В случае фильтров Вина – они могут быть расположены в этом же канале последовательно, а для дефлекторов неизбежно должны быть реализованы дополнительные каналы.

4.6.3 Модернизированная восьмипериодическая структура

С учетом вышесказанного, была реализована восьмипериодическая структура на основе простейшей ФОДО ячейки. В такой структуре может быть применены обе опции подавления МДМ-компоненты: прямыми фильтрами Вина и электростатическими дефлекторами с киккер-магнитами.

В этом случае интересным является случай с использованием дефлекторов, тогда нет необходимости использовать прямые промежутки для нужд ЭДМ эксперимента. Дефлекторы могут быть расположены как по краям, так и в центре рис. 4.9, при этом расстояние между каналами составляет 47 и 50 см соответственно.

Подавление дисперсии на арки может быть осуществлено выбором кратного количества набега фазы $\nu_{x,y} = 1$, что показано на рис. 4.9. Стоит отметить, что наличие электростатики при энергии $E_{\text{edm}} = 270$ МэВ, искажает дисперсию на длине периода, которая не компенсируется соответствующим магнитным полем. Однако, она может быть дополнительно компенсирована квадрупольями арки, при этом набег фазы также искажается, что может приводить к сложностям с подавлением нелинейности. Пример такой компенсации показан на рис. 4.10.

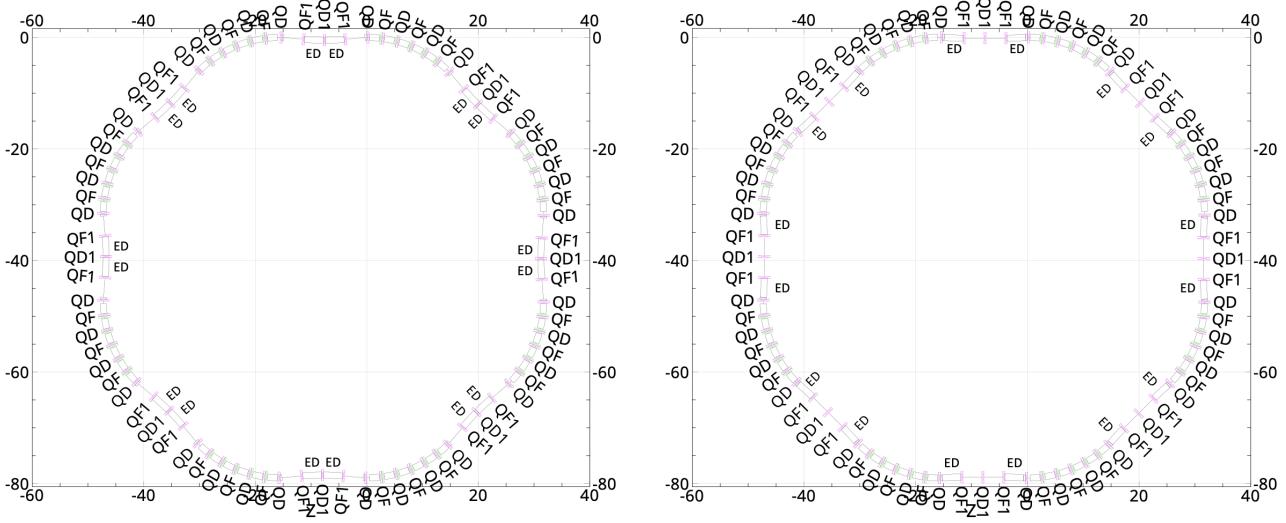


Рисунок 4.9 — Принципиальная схема расстановки восьмипериодической структуры Nuclotron с текущей расстановкой при введении электростатических дефлекторов.

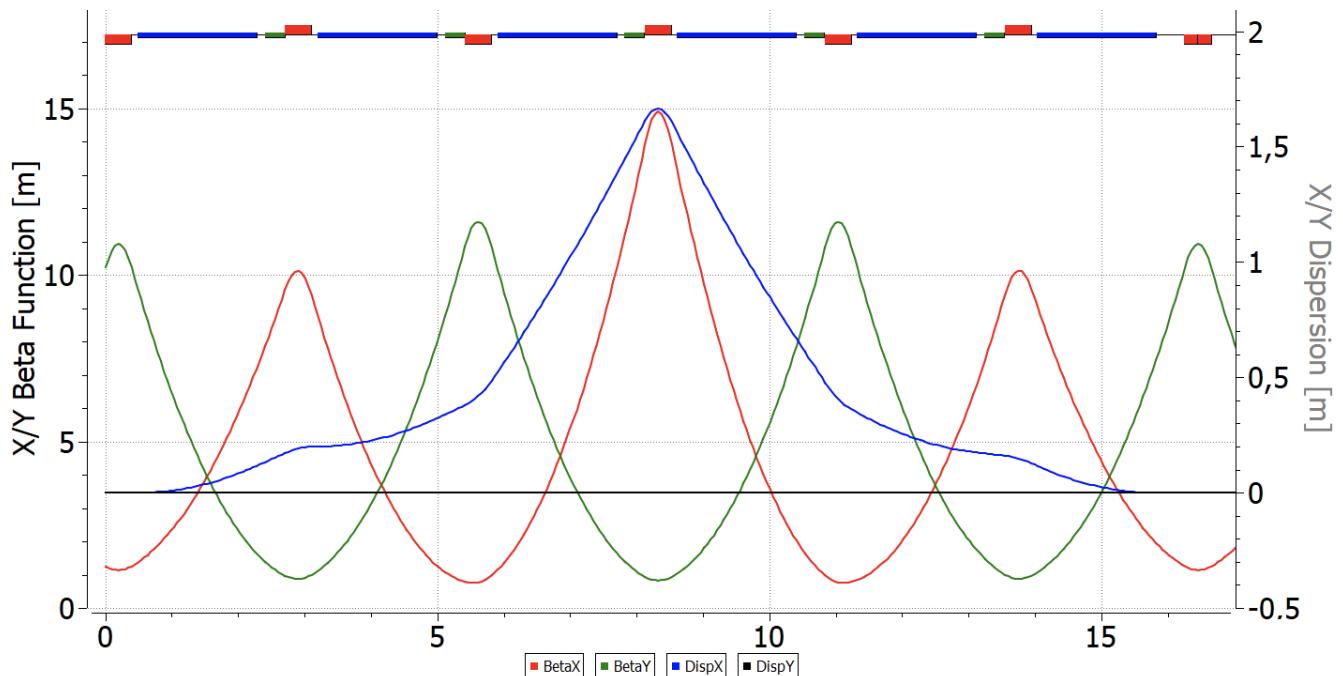


Рисунок 4.10 — Твистс-функции регулярной поворотной арки восьмипериодической модернизированной структуры Nuclotron.

4.6.4 Модернизированная 16-периодическая структура

С целью увеличения точности проведения эксперимента, квази-замороженный спин может быть как можно больше приближен к режиму замороженного спина при увеличении периодичности, согласно ур. 4.20. Особенno это

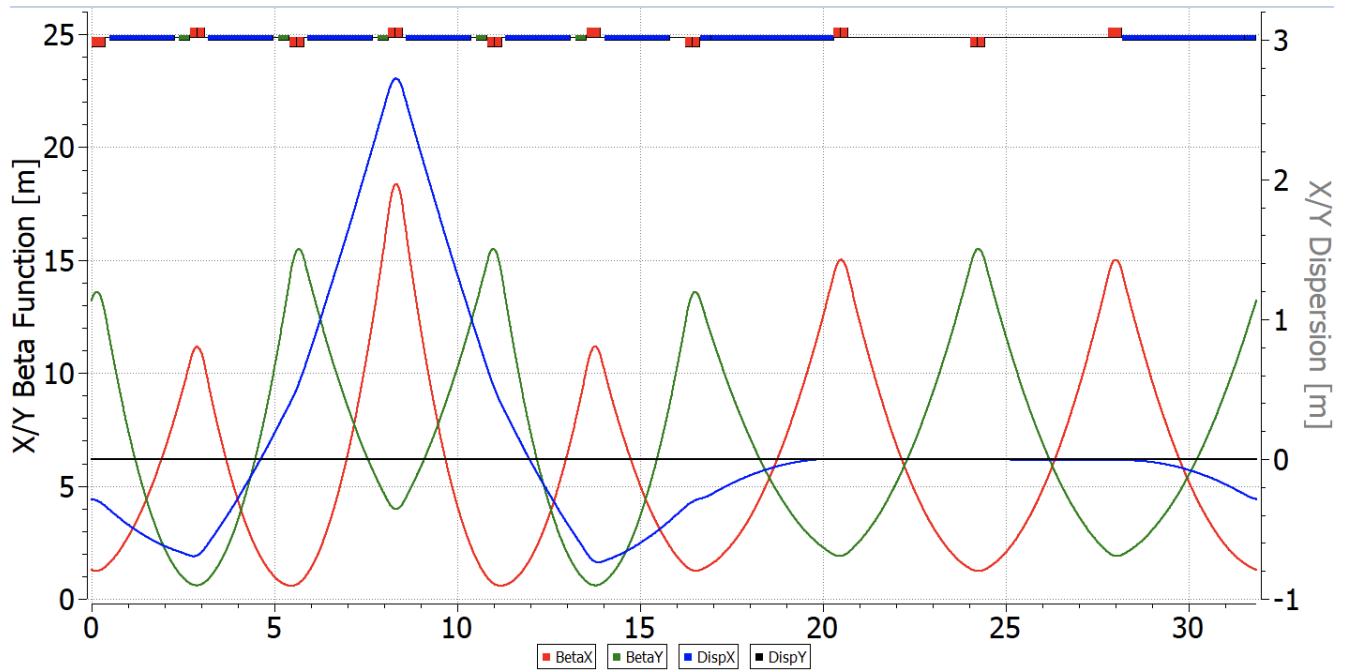


Рисунок 4.11 — Твист-функции регулярной поворотной арки восьмипериодической модернизированной структуры Nuclotron с дефлекторами.

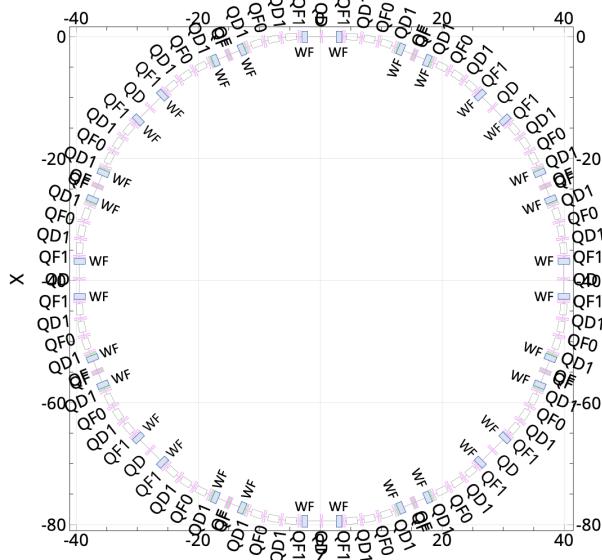


Рисунок 4.12 — Принципиальная схема расстановки восьмипериодической структуры Nuclotron с текущей расстановкой при введении электростатических дефлекторов.

важно для изучения ЭДМ протона, согласно таблице 6. Для этого, в уже рассмотренном случае восьмипериодической структуры, магнитная арка может быть раздвинута для создания дополнительного промежутка, однако такой подход нарушает регулярность и соответствующая структура должна быть рассмотрена как резонансная, подобно представленному в Главе 3. Стоит отметить, что 16-ти периодической эта структура называется именно по

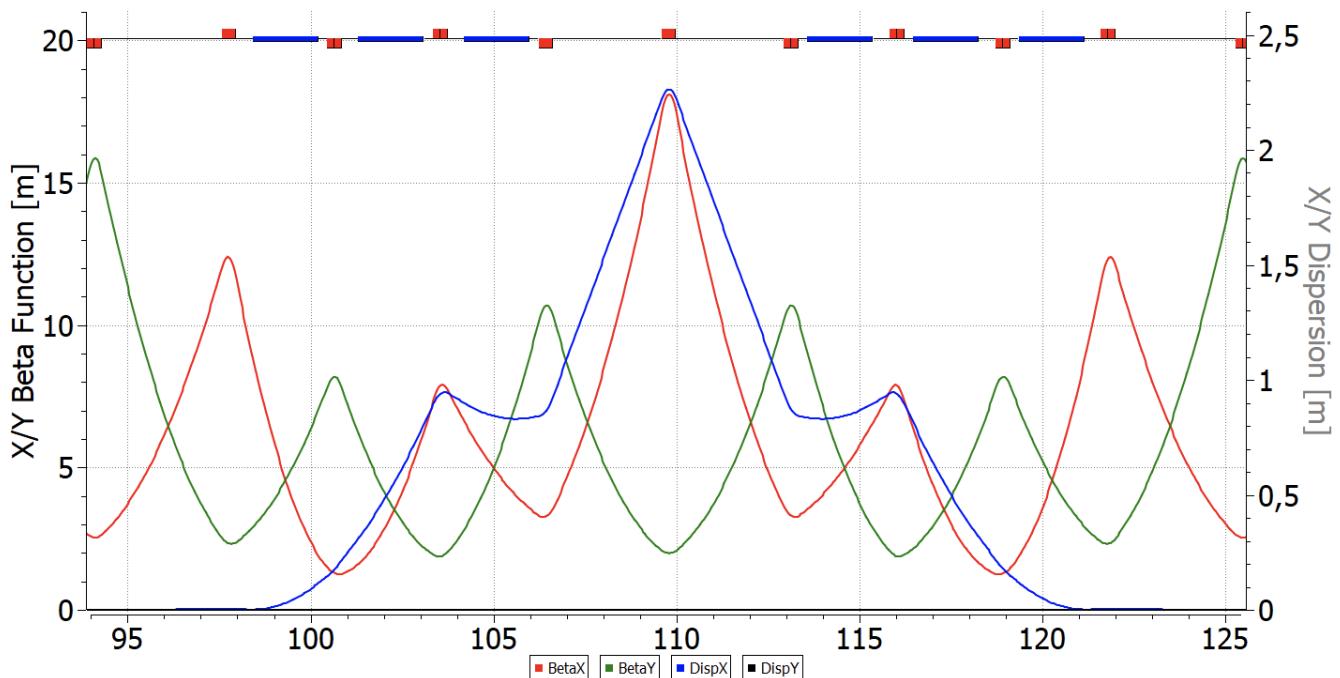


Рисунок 4.13 — Твисс-функции 16-периодической модернизированной структуры Nuclotron без фильтров Вина.

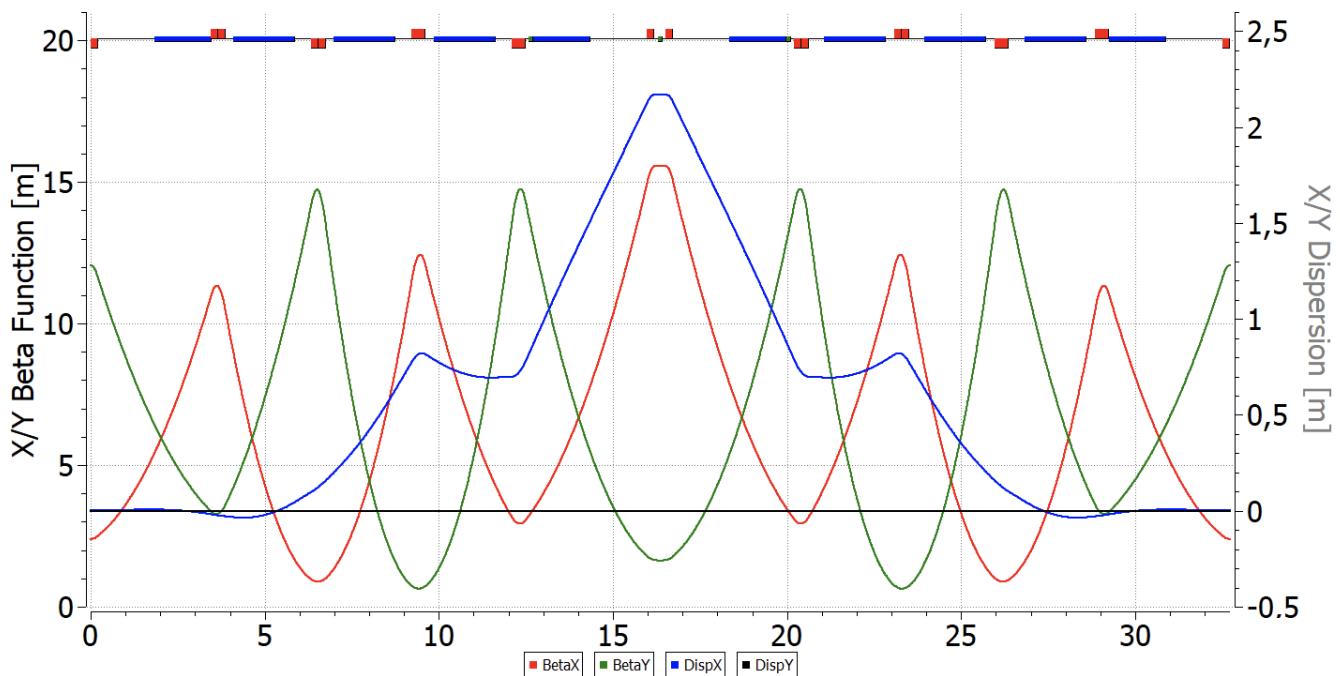


Рисунок 4.14 — Твисс-функции 16-периодической модернизированной структуры Nuclotron с фильтрами Вина.

причине возможности разделения фильтров Вина на большее количество, делая угол отклонения спина меньше двое, по сравнению с приведенной выше структурой. Однако, по своей сути, магнитная структура имеет периодичность равную 8.

С точки зрения построения магнито-оптической структуры модернизированного Нуклotronа следовали нескольким целям. Во-первых, как мы видим суперпериод построен таким образом, чтобы в центральной ячейке было дрейфовое пространство без поворотных магнитов, в том месте, где дисперсионная функция имеет максимальное значение при бесконечном значении кривизны траектории, что позволит поднять критическую энергию. Во-вторых, число суперпериодов равное восьми, незначительно превышает частоту бетатронных колебаний ν_x в горизонтальной плоскости, что облегчает регулировку коэффициента уплотнения орбиты. В-третьих, введение центрального дрейфа упрощает размещение трех семейств секступолей, необходимых для регулирования бетатронной и спиновой хроматичностей, в то время, как боковые дрейфовые участки удобны для размещения фильтров Вина.

Таблица 8 — Параметры структур Nuclotron.

Структура	Длина магнита, м	Количество магнитов	$B\rho$, Т·м	Макс. энергия дейtronов, ГэВ	Макс. энергия протонов, ГэВ
Текущая	1.44	96	39.6	10.14	10.97
8-период.	1.78	48	24.4	5.7	6.47
16-период.	1.78	48	24.5	5.7	6.47

4.7 Предпосылки модернизации главного кольца NICA

Для изучения ЭДМ в кольце коллайдера NICA рассматривается использование концепции квази-замороженного спина, поскольку поворотные арки являются чисто магнитными. Коллайдерная мода использует всё пространство прямых промежутков для установки необходимого оборудования (охлаждение, ускоряющие ВЧ-станции, диагностика), а также имеет точки соударения для изучения в детекторах. Для решения обоих указанных проблем, могут быть созданы альтернативные обводные каналы (bypass), в которых будут расположены прямые фильтры Вина. Таким образом, появляется возможность использования главного кольца NICA в качестве накопителя, а не в режиме коллайдера. Создание обводных каналов является большим преимуществом,

не требующим значительной перестройки комплекса и затрат, при этом, позволяющим задействовать NICA в различных экспериментах. Особая форма коллайдера – рэйстрек (racetrack), состоит из двух магнитных поворотных арок и имеет таким образом периодичность равную двойке. Данная особенность существенно ограничивает потенциал установки для изучения ЭДМ протона, поскольку в такой конфигурации невозможно накопления ЭДМ-компоненты. Однако, сохраняется потенциал для изучения ЭДМ дейтрона. Отдельным преимуществом коллайдера является наличие двух колец и возможности изучения пучка в прямом и обратном направлении. Данное условие необходимо ЭДМ исследований.

Проектируя накопительное кольцо NICA с обводными секциями, требуется оставить геометрию арок неизменной для полного сохранения исходных функций. Возможно лишь изменение полей в уже установленных элементах. В будущем вся предлагаемая магнитооптика будет рассмотрена для дейтронов с энергией 240 МэВ. Стоит отметить, что расчеты показывают основные параметры магнитного поля основных диполей арки $B_{\text{dip}} = 0.132$ Т, а также магнитную жесткость $B\rho = 3.252$ Т·м. Ненулевая дисперсия в поворотной арке подавлена по краям, таким образом прямой участок имеет нулевую дисперсию по всему периметру. Общая длина оригинального кольца NICA $L_{\text{acc}} = 503.04$ м., длина одной арки составляет $L_{\text{arc}} = 142.15$ м., остаётся доступным $(L_{\text{acc}} - 2L_{\text{arc}})/2 = 109.6$ м. для организации обводного канала.

Для орбитального отклонения рассматривались дипольные магниты, чтобы обеспечить отклонение на угол $\alpha = 9$. Сила диполя $B_{\text{BP}} = 1$ Т при длине $L_{\text{dip}}^{\text{BP}} = 50$ см. Альтернативный прямой участок находится на расстоянии 1 м от исходного, поэтому длина обводного участка $L_{\text{BP}} = 1/\sin\alpha \sim 6.4$ м. Принципиальная схема обходных каналов показана на рисунке 4.15.

Отклоняющие магниты искажают дисперсионную функцию. Таким образом, необходимо было использовать по меньшей мере 2 фокусирующих квадруполя на обходном канале для подавления дисперсии на выходе. Это поможет обеспечить нулевую дисперсию на всем прямолинейном участке. Чтобы гарантировать периодичность и симметрию бета-функций, можно использовать или один, или три дефокусирующих квадруполя. Будут рассмотрены два случая, с адаптированными прямыми участками, идентичным поворотным аркам, но без магнитов. Это сделано для простоты моделирования в регулярной иде-

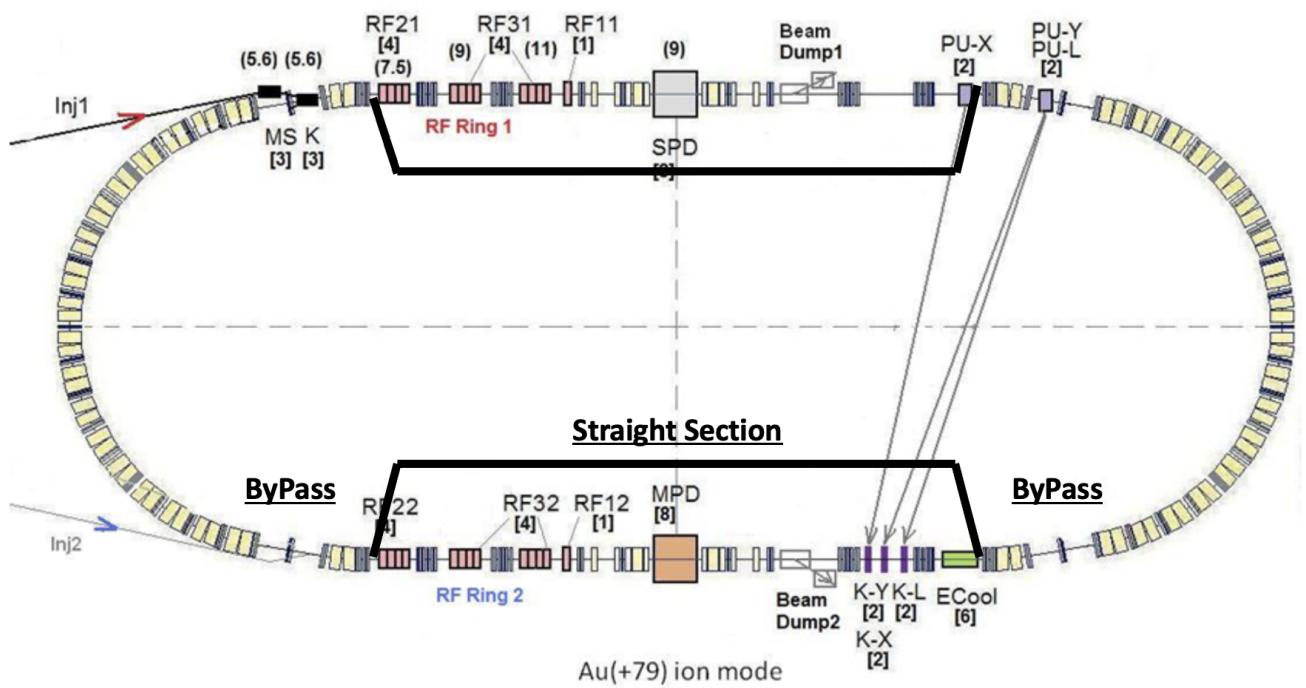


Рисунок 4.15 — Принципиальная схема обходных каналов bypass в существующем комплексе NICA.

альной структуре. Наконец, мы рассмотрим реальный случай магнитооптики с полностью регулярной ФОДО прямой секцией.

4.7.1 Первичная схема с 3 квадрупольями

В этом случае байпас состоит из минимально возможных 3 квадрупольей: 2 фокусирующих QBP1 и 1 дефокусирующий QBP2, что показано на рис. 4.16. Согласование арки с каналом bypass обеспечивается тремя квадрупольями QM1, QM2, QM3 (секция согласователя Matching M1). А согласование bypass с прямым участком симметрично осуществляется такими же квадрупольями QM1, QM2, QM3. Это возможно в силу изначально заложенной симметрии между аркой и прямым участком. Тогда общая длина всего ускорителя составит $L_{\text{3quad}}^{\text{acc}} = 503.46$ м.

На рисунке 4.17 приведены Твисс-функции, черными линиями указаны границы отклоняющего участка. Максимум бета-функции β_y расположен в центре канала. И может принимать большее значение, по сравнению с β_x . По этой причине можно рассмотреть случай с 5 квадрупольями в обводном канале.

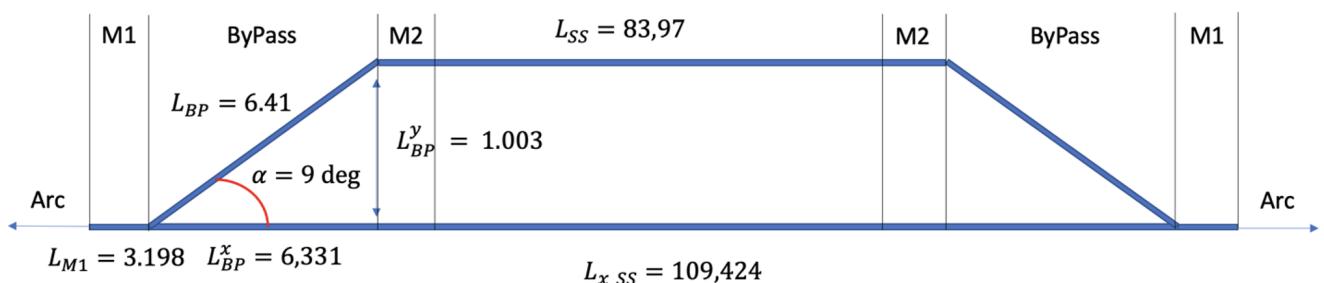


Рисунок 4.16 — Принципиальная схема bypass с 3 квадрупольями.

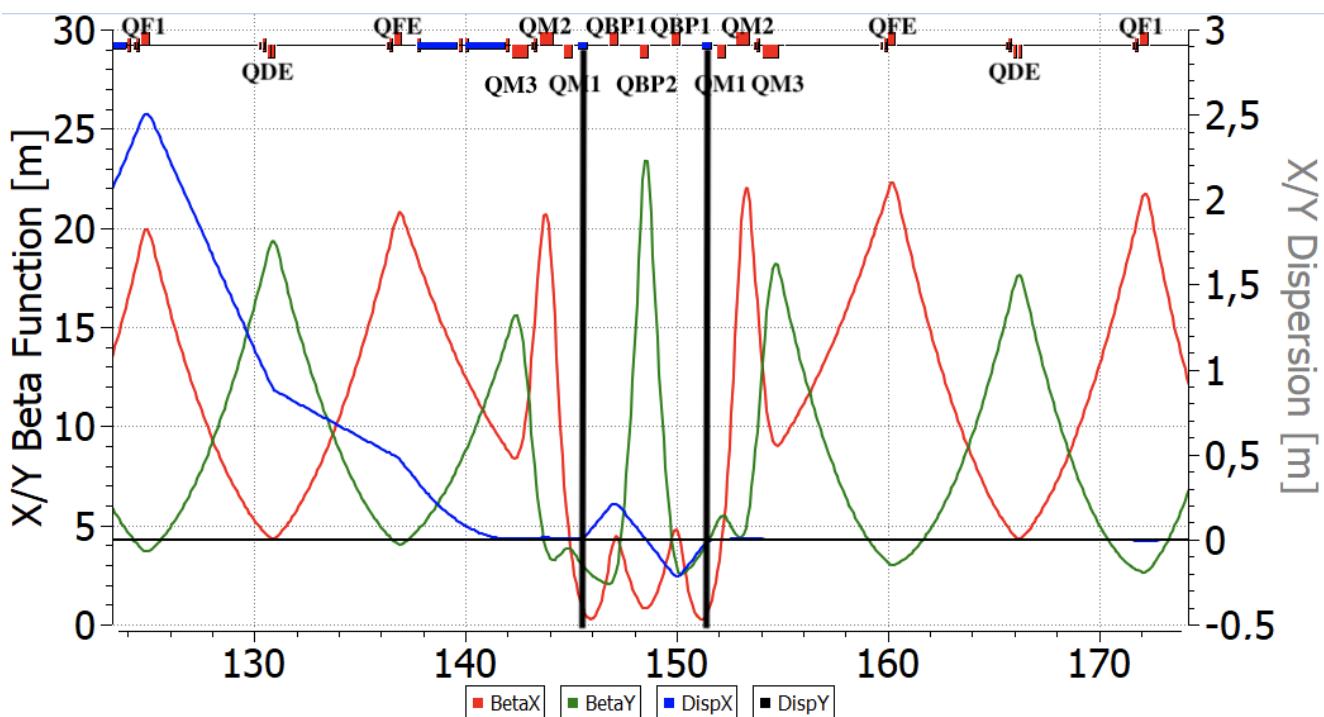


Рисунок 4.17 — Твисс-параметры для bypass с 3 квадрупольями. Чёрными линиями показано расположение дефлекторов.

4.7.2 Модернизированная схема с 5 квадрупольями

По сравнению с предыдущим случаем, обводной канал состоит из 5 квадрупольей, которые представлены 2 семействами: фокусирующими QBP1 и дефокусирующими QBP2. Он становится длиннее $L_{5\text{quad}}^{BP} = 9.35$ м и отклоняется на 1.46 м., что показано на рис. 4.18. Теперь секции согласования M1 и M2 по-прежнему идентичны, но представлены двумя квадрупольями QM1 и QM2 для обеспечения регулярности Твисс-функций. Однако, полная длина ускорителя становится больше исходного $L_{5\text{quad}}^{\text{acc}} = 510.02$ м. На рисунке 4.19 показаны, что максимум β_y становится меньше в центре. Стоит отметить, что максимум

дисперсионной функции стал увеличился от $D_x^{3\text{quad}} \sim 0.2$ м до $D_x^{5\text{quad}} \sim 0.5$ м. Таким образом, этот случай должен быть адаптирован к реальному.

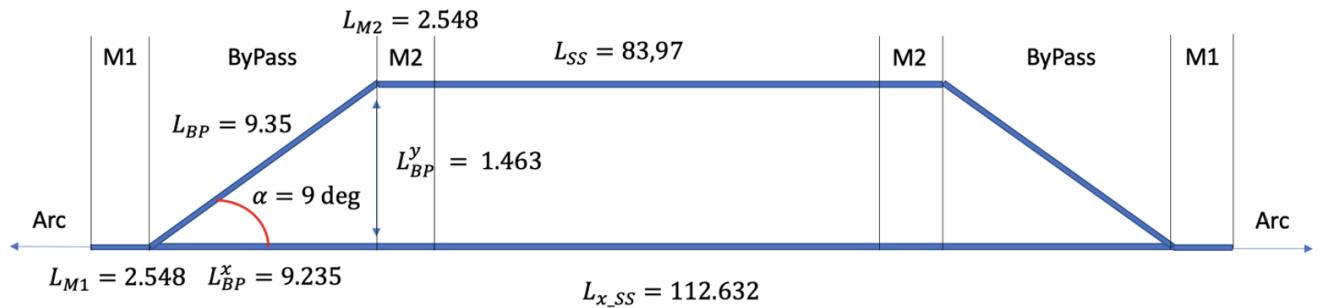


Рисунок 4.18 — Принципиальная схема bypass с 5 квадруполями.

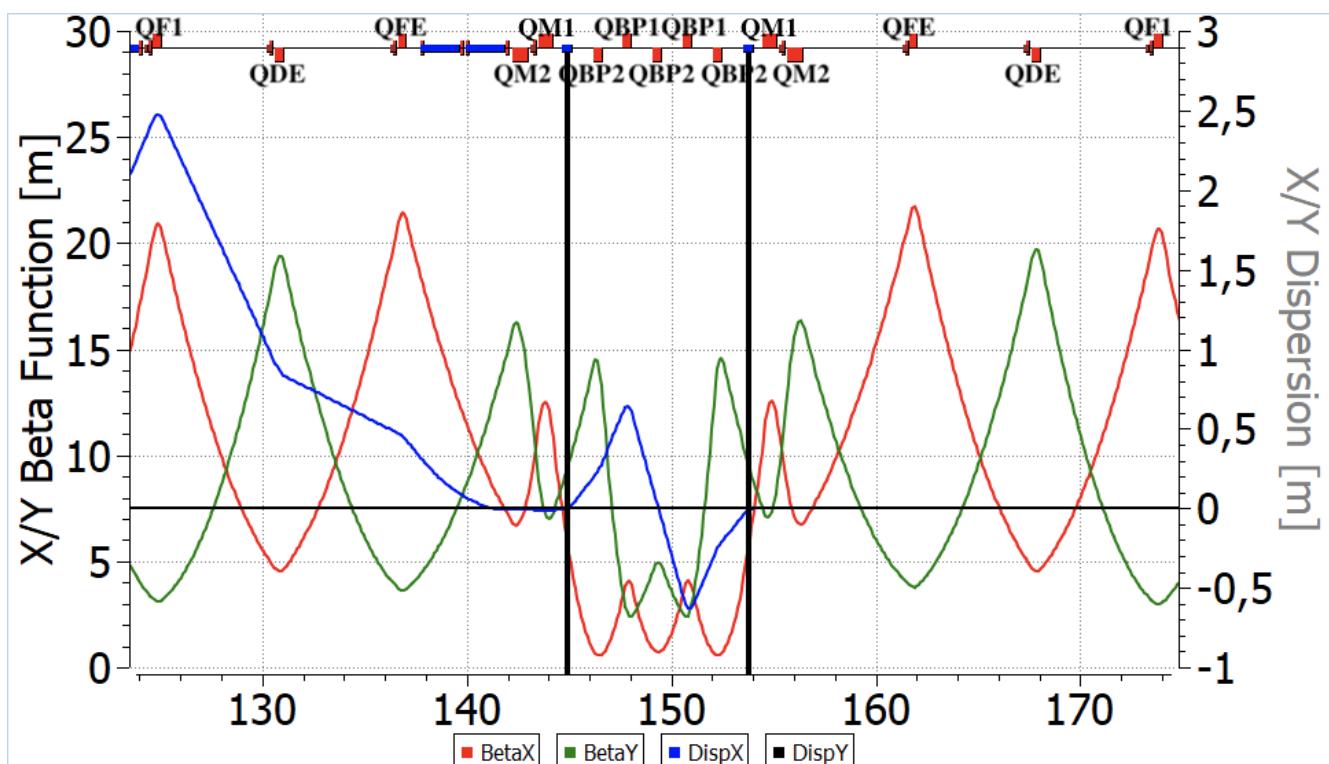


Рисунок 4.19 — Твисс-параметры для bypass с 5 квадруполями. Чёрными линиями показано расположение дефлекторов.

4.7.3 Адаптированный вариант

Основываясь на рассмотренных примерах, наконец, можно получить структуру, максимально адаптированную к реальным длинам установки. Теперь рассмотрим полностью регулярный прямой участок, который стал короче

$L_{SS}^{BP} = 80.71$ м (рис. 4.20). Отклоняющий канал состоит из 5 квадрупольей и отклоняет пучок на 1.46 м. Но для согласования использовались разные секции M1 и M2, чтобы компенсировать асимметрию между поворотной аркой и прямым участком. Наконец, Твисс-функция половины bypass NICA, представлена на рисунке 4.21. В центре прямой секции расположены фильтры Вина. Все расчеты выполнены при помощи программ OptiM [28] и COSY Infinity [31].

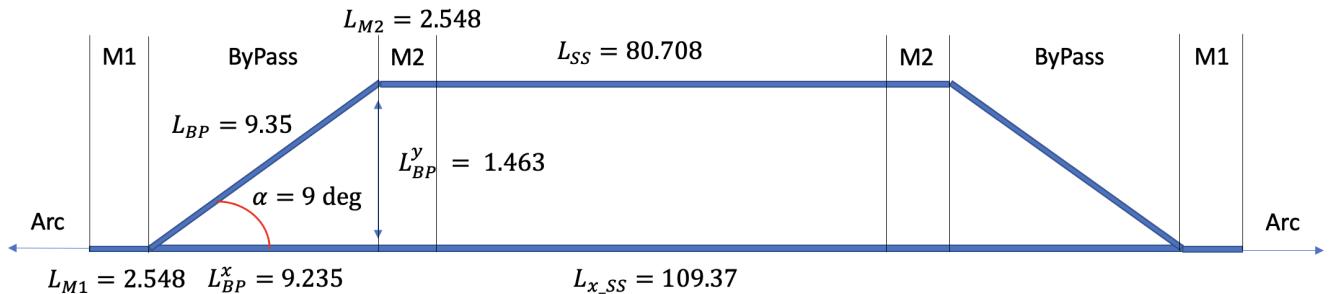


Рисунок 4.20 — Принципиальная схема адаптированной структуры кольца NICA с bypass.

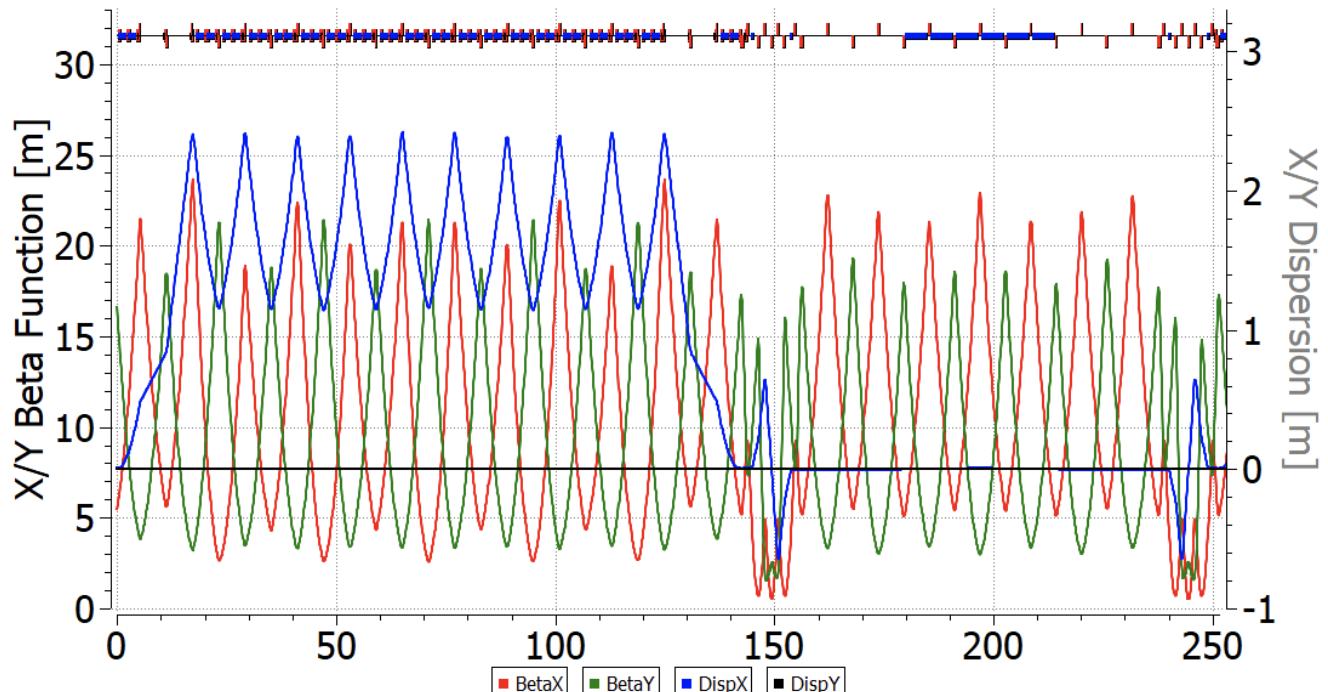


Рисунок 4.21 — Твисс-функции для половины адаптированной структуры кольца NICA с bypass. Фильтры Вина, расположенные на прямом участке.

4.8 Спин-орбитальный трекинг в магнитном кольце со скрещенными E+В элементами

Траектория спина показана на рисунке 4.22 в одной половине модернизированного кольца bypass NICA и состоит из: поворотной арки, отклоняющего канала, прямого сегмента и двух секций согласователя (M1 и M2). Рассматривается вертикально поляризованная частица с небольшим начальным отклонением. Как видно, фильтры Вина на прямом участке компенсируют вращение спина в дуге и восстанавливают его до исходного значения.

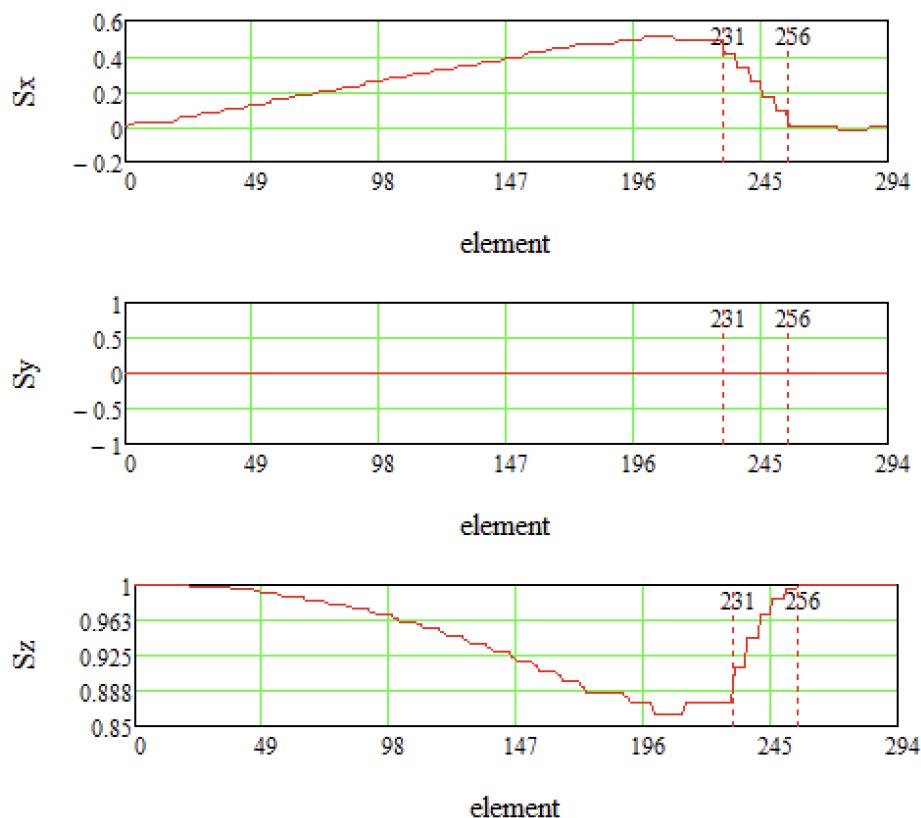


Рисунок 4.22 — Траектория спина в половине модернизированного кольца bypass NICA. Арка и прямая секция с фильтрами Вина ((обозначены красными пунктирными линиями). Вертикально поляризованный частица \vec{S} (0,0,1). Показана зависимость S_x , S_y и S_z от номера элемента (длины).

Орбитальное движение частиц в трехмерном пространстве оказывает влияние на спиновую динамику, и согласно ур. 4.1 спин различных частиц, прецессирует с различными частотами вокруг инвариантной оси. При значительном разбросе, нарушается спиновая когерентность, тем самым ограничивая возможность измерения ЭДМ. Для обеспечения спиновой когерентности необходимо

использовать нелинейные элементы, секступоли, расположенные в местах с ненулевой дисперсией, на поворотных арках. Так как секступоли также влияют и на бетатронную хроматичность, мы рассматриваем возможность одновременного подавления обоих эффектов.

4.8.1 Декогеренция спина

Сдвиг распределения равновесного уровня энергии из-за бетатронного движения и ненулевого коэффициента уплотнения импульса второго порядка основан на синхронном принципе [89] и определяется с помощью:

$$\Delta\delta_{eq} = \frac{\gamma_s^2}{\gamma_s^2\alpha_0 - 1} \left[\frac{\delta_0^2}{2} \left(\alpha_1 + \frac{3\beta_s^2}{2\gamma_s^2} - \frac{\alpha_0}{\gamma_s^2} + \frac{1}{\gamma_s^4} \right) + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)_\beta \right] \quad (4.21)$$

для определения относительного удлинения орбиты из-за бетатронных колебаний:

$$\left(\frac{\Delta L}{L} \right)_\beta = \frac{\pi}{2L} [\varepsilon_x \mathbf{v}_x + \varepsilon_y \mathbf{v}_y], \quad (4.22)$$

где индекс s означает синхронную частицу, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – эмиттансы, $\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y$ – частота бетатронных колебаний, δ_0 – относительный разброс импульса, α_0, α_1 – два первых порядка коэффициента уплотнения импульса. Разные частицы имеют различный импульс, и существует необходимость в использовании понятия эффективной энергии пучка:

$$\gamma_{\text{eff}} = \gamma_s + \beta_s^2 \gamma_s \Delta\delta_{eq} \quad (4.23)$$

Более формальная теория подразумевает воздействие внешнего (секступольного) поля. Принимая во внимание выражение для полного удлинения орбиты из [90]:

$$\Delta C_\Sigma = -2\pi (J_x \xi_x + J_y \xi_y) + \delta_0 (\alpha_0 + \alpha_1 \delta_0 + \alpha_2 \delta_0^2 + \dots), \quad (4.24)$$

где ξ_x, ξ_y – хроматичность в x, y плоскостях. Исходя из представленных уравнений, для коррекции орбитального движения могут быть использованы

секступоли для компенсации натуральной хроматичности, а также коэффициента уплотнения орбиты.

4.8.2 Секступольная коррекция

Достижение спиновой когерентности является отдельной сложной задачей, и такие эксперименты были проведены на ускорителе COSY в Юлихе, Германия, чтобы получить время когерентности (Spin Coherence Time) SCT на уровне 1000 секунд [91]. Секступоли располагаются в местах с ненулевой дисперсией на поворотных арках. В минимумах и максимумах дисперсионной $D_{x,y}$ и бета $\beta_{x,y}$ функциях оказывают наибольшее воздействие и физически располагаются рядом с квадрупольными линзами. Твисс-функции арки NICA являются регулярными и показаны на рис. 4.23.

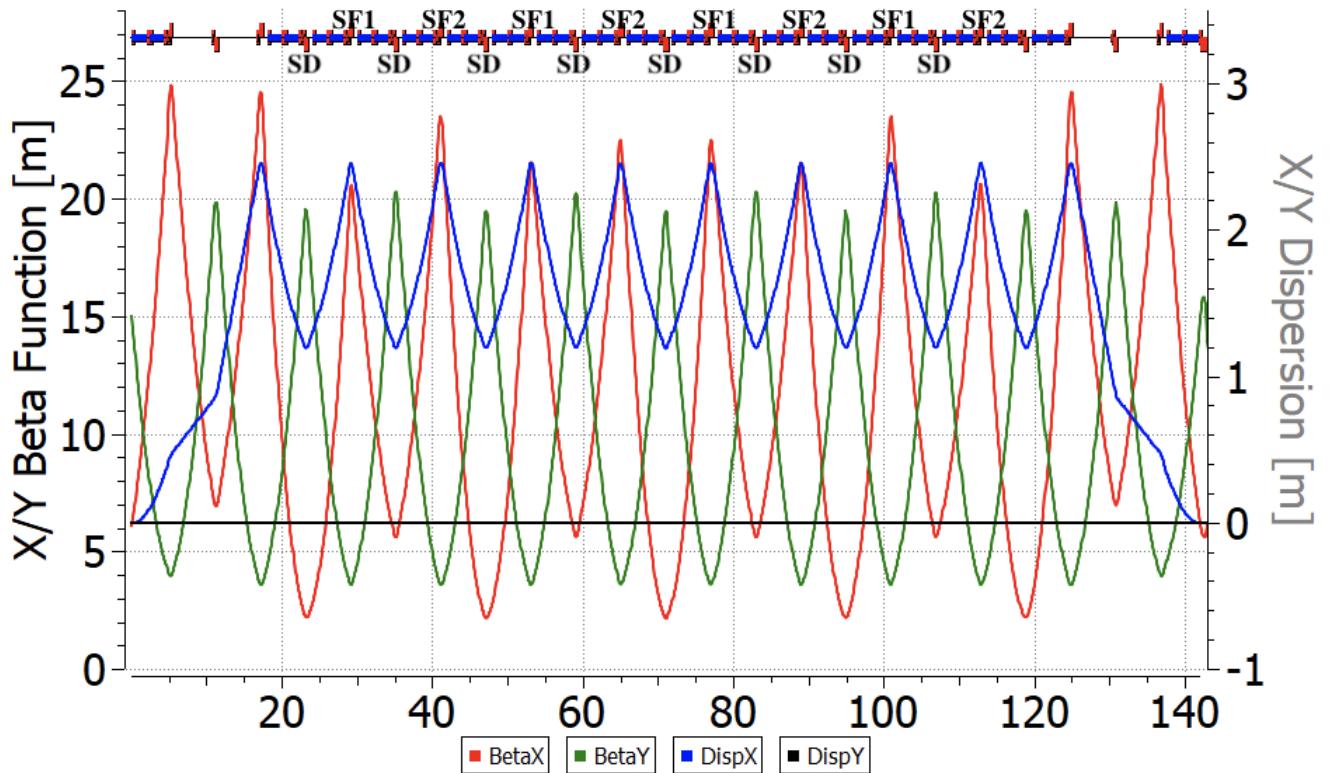


Рисунок 4.23 — Твисс-параметры bypass NICA для дейtronного режима в OptiM. Также показано расположение секступольных семейств.

Бетатронная хроматичность. Для коррекции бетатронной хроматичности достаточно использовать только 2 семейства секступолей: одно вблизи

фокусирующих квадрупольей, другое – рядом с дефокусирующими. Натуральная хроматичность рассматриваемого накопительного кольца bypass NICA равна $\nu_{x,y} = -17/-17$. После оптимизации можно отслеживать частоту прецессии спина на рис. 4.24: красная линия показывает натуральную хроматичность, синяя – скорректированную, подавленную до нуля. Для этого случая также был осуществлен спин-трекинг в течение 3×10^6 оборотов для частиц с различным начальным отклонением в координатах x, y, d с начальной ориентацией спина \vec{S}_0 под углом 45 градусов в плоскости $y - z$, что показано на рис. 4.25.

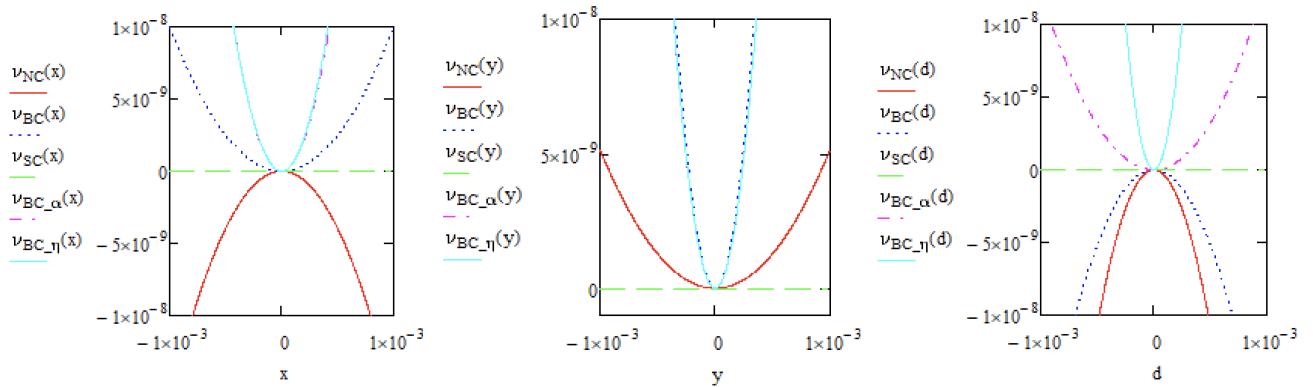


Рисунок 4.24 — Зависимость частоты прецессии спина от координат x, y, d для различных случаев оптимизации. NC – натуральная хроматичность (красная линия); BC – нулевая (бетатронная) хроматичность (синяя пунктирная линия); SC – спиновая когерентность (зеленая линия); BC_α – нулевая хроматичность и $\alpha_1 = 0$ (фиолетовая линия); BC_η – нулевая хроматичность и ноль $\eta_1 = 0$ (светло-голубая линия).

Спиновая когерентность. Чтобы достигнуть спиновой когерентности, рассмотрим чисто частоту прецессии спина. COSY Infinity [31] не может работать вблизи нулевого значения частоты прецессии спина. Так как это может привести к ошибке из-за резонанса, по этой причине отстраиваемся до уровня $\nu_s \sim 10^{-4}$. Но к частицам предъявляется требование прецессировать синхронно – когерентно. Основным параметром является частота вращения спина, которая в общем случае зависит от координат и энергии. Можно видеть, что доминирующим компонентом является квадратичный член в разложении частоты спиновой прецессии. Это видно на Рисунке 2 для обоих случаев – как для натуральной хроматичности, так и скорректированной хроматичности. По этой причине секступоли могут быть выбраны другим способом, чтобы достигнуть спиновой когерентности, путем подавления вторых порядков.

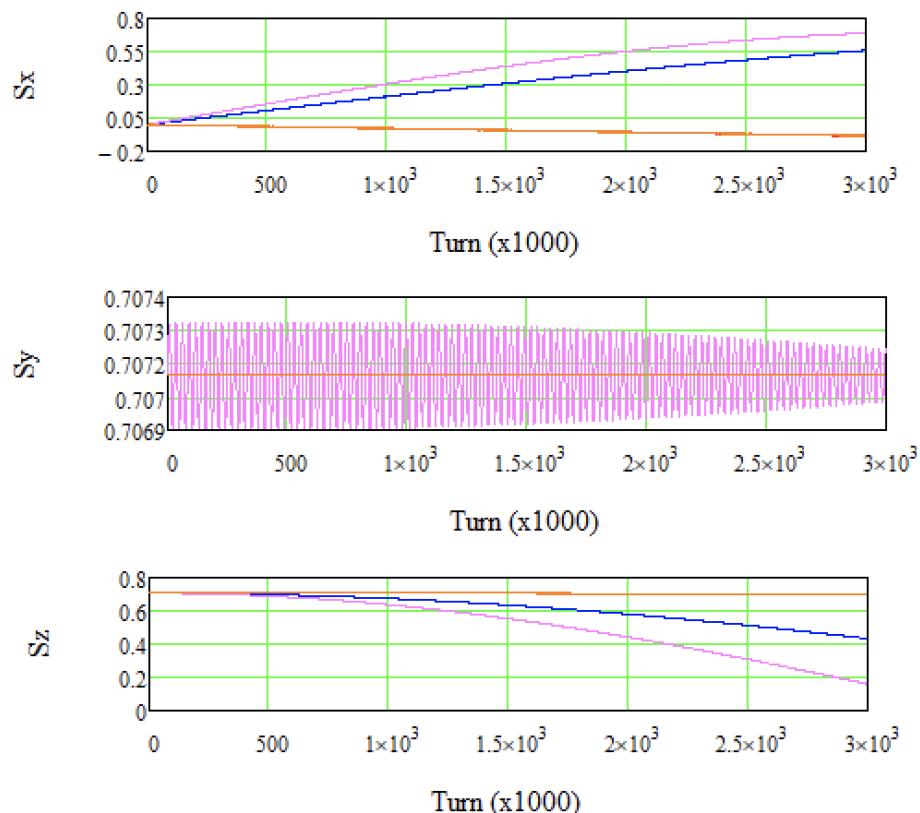


Рисунок 4.25 — Спиновый трекинг частиц с различным начальным отклонением в координатах x , y , d с использованием 2 семейств секступолей для получения нулевой бетатронной хроматичности.

Как мы можем видеть из ур. 4.21, 4.24 недостаточно использовать только 2 линейно независимых семейства для независимой вариации трёх параметров орбитального движения. Таким образом, третье семейство должно быть использовано для подавления зависимости от энергетической компоненты. Но в регулярных структурах бета β и дисперсионные D функции не позволяют использовать 3 линейных независимых семейства. Введение линейно-зависимых семейств показано на параметрах Твисса, где расположены семейства: SF1, SF2, SD. В этом методе мы не влияем на хроматичность, просто отслеживаем её значение $v_{x,y} = -13/-18$. Этого недостаточно для обеспечения стабильного орбитального движения. В этом случае можно видеть, что спиновая когерентность достигнута – нет зависимости частоты спиновой прецессии от координат и энергии (рис. 4.24: зеленая линия). Результаты спинового трекинга частиц подтверждают это утверждение. На рис. 4.26, частота вращения спина $v_s 10^{-7}$, количество оборотов 3×10^6 оборотов или 3 секунды. Частицы с различным начальным отклонением прецессируют с одинаковой спиновой частотой. Но в

в этом случае максимум секступольного коэффициента принимает большое значение, что может вызвать нелинейные эффекты (Таблица 9).

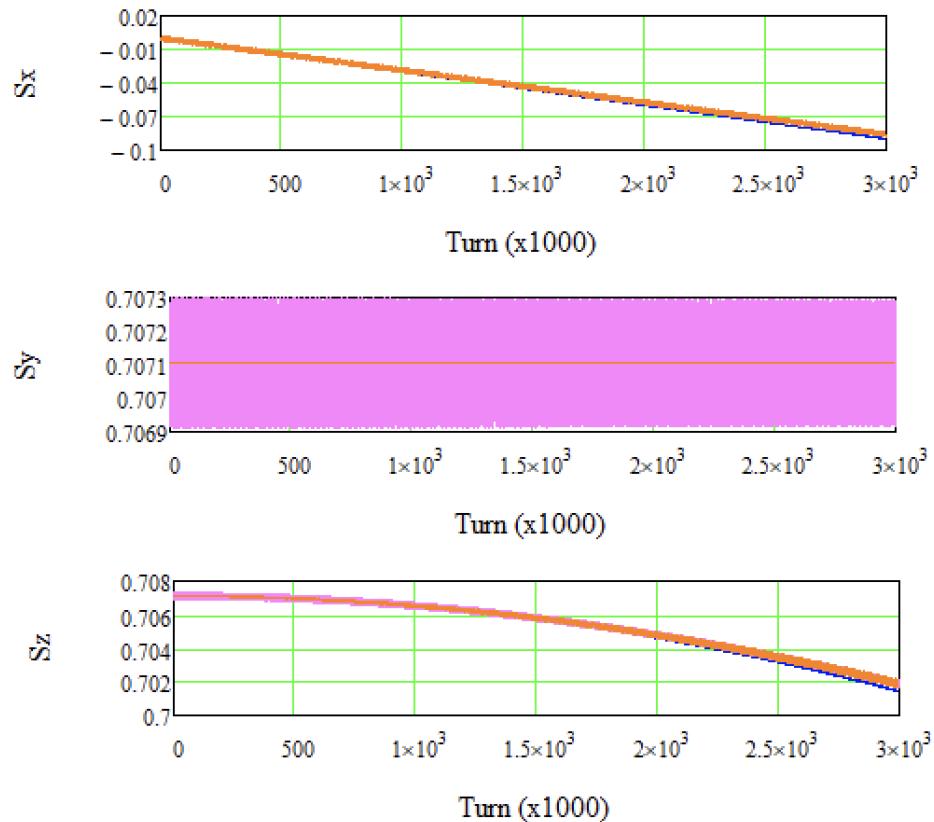


Рисунок 4.26 — Спиновый трексинг частиц с различным начальным отклонением в координатах x , y , d с использованием 3 семейств секступолей для получения спиновой когерентности.

4.8.3 Коррекция высших порядков

Как мы можем видеть, чистая коррекция бетатронной хроматичности не позволила нам получить нулевой разброс частоты вращения спина. Одновременно, получение спиновой когерентности, путем подавления квадратичного члена частоты спиновой прецессии, не подавляет хроматичность. Исходя из ур. 4.24, значение $\delta_0 \alpha_0$ может быть усреднено с использованием ВЧ для смешивания. Таким образом, чтобы гарантировать нулевое удлинение орбиты, хроматичности должны быть подавлены ξ_x, ξ_y вместе со значением α_0 до нуля. Это также возможно при использовании только независимых 3-х семейств секступолей.

Представленный способ не позволяет добиться спиновой когерентности в представленной структуре. На рис. 4.24 (фиолетовая линия) показана ненулевая зависимость частоты прецессии спина от координат. Аналогично справедливо, если мы следуем ур. 4.21 и подавляем значение η_1 вместе с коррекцией хроматичности (рис. 4.24 светло-синяя линия). Кроме того, максимальное значение секступольного градиента слишком велико и не может быть реализовано.

Окончательно, были рассмотрены различные случаи оптимизации секступолями. Квадратичные члены в разложении по частоте спиновой прецессии являются наиболее важными и представляют зависимость от координат и энергии. Все основные параметры, которые подвергались мониторингу, приведены в Таблице 9. Исследование показывает, что невозможно использовать 3 семейства секступолей в регулярной структуре для достижения как бетатронной хроматичности, так и спиновой когерентности. Более того, максимальное значение коэффициента секступолей неудовлетворительно и может привести к нелиней-

Таблица 9 — Сравнение параметров с различной вариацией оптимизации оптимизацией.

Параметр	Без оптимизации	Хроматичность	Спиновая когерентность	Хроматичность + α_1	Хроматичность + η_1
Частота бетатронных колебаний	-17/-17	0/0	-13/-18	0/0	0/0
Коэф. α_1	0.2	-0.4	-0.37×10^{-2}	$\sim -10^{-12}$	-0.85
Коэф. $ K_x $	0.16×10^{-1}	0.55×10^{-1}	0.27×10^{-13}	0.55×10^{-1}	0.56×10^{-1}
Коэф. $ K_y $	0.51×10^{-2}	0.76×10^{-1}	0.12×10^{-12}	0.78×10^{-1}	0.78×10^{-1}
Коэф. $ K_z $	0.43×10^{-1}	0.20×10^{-1}	0.13×10^{-12}	0.13×10^{-1}	1.6×10^{-1}
# семейств секступолей	Без секступолей	2	3	3	3
Макс. поле секступолей [m^{-3}]	-	2.7	19.4	4.9	104.2

ным неустойчивостям. Стоит отметить, что регулярная дисперсионная функция на поворотной арке не позволяет найти 3 линейных независимых семейства, так как они располагаются в одних и тех же минимумах/максимумах бета и дисперсионных β , D функциях. Однако, возможно промодулировать дисперсионную функцию таким образом, чтобы получить в чистом виде 3 линейных независимых семейства секступолей. Также одним из возможных решений проблемы является использование охлажденного пучка на уровне $\frac{dp}{p} \approx 10^{-5}$. Это может помочь свести к минимуму γ -эффективное и, наконец, обеспечить спиновую когерентность одновременно с подавленной бетатронной хроматичностью.

Выводы

Рассмотрена спин-орбитальная динамика элементарных частиц в синхротронах, функционирующих, в режиме накопительного кольца.

1. Исследована спиновая динамика в электрических и магнитных полях. Изучено поведение спина в электростатических дефлекторах, а также фильтрах Вина для реализации квази-замороженного спина;
2. Рассмотрена модернизация кольца для независимых ЭДМ экспериментов, с сохранением функции бустера. Предложены 8-ми и 16-ти периодические структуры с реализованной концепцией квази-замороженного спина. Большим преимуществом обладает структура с использованием фильтров Вина, которая может быть использована как для изучения ЭДМ дейтрана, так и протона при меньшей энергии;
3. Метод введения обводных bypass позволяет создать альтернативные прямые участки и в конечном счёте расширить область применения синхротрона для фундаментальных исследований по прецизионным экспериментам;
4. Исследована возможность получения когерентного пучка в регулярной структуре, необходимого для применения метода частотной области при изучении ЭДМ. Показано, что управление достигается использованием секступолей. Однако, подавление хроматичности и достижение когерентности при использовании только двух семейств секступолей невозможно. Требуется как минимум 3 независимых семейства, распо-

ложенных в максимумах бета и дисперсионной функций. Такой подход требует внесения нерегулярности, что например возможно в резонансной структуре.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа внутрипучкового рассеяния, а также стохастического охлаждения показано, что варьирование коэффициента проскальзывание в резонансной структуре способно увеличить эффективность стохастического охлаждения. Особенно эффективным может быть использование комбинированной структуры. Однако, эффекты ВПР для приведенных структуры оказались в несколько раз большими и в конечном счёте недостаточными, делая предпочтительной регулярную структуру для тяжелоионного эксперимента с минимально модулированным Твисс-функциями;
2. Для коллайдерных экспериментов с поляризованными протонами резонансная структура позволяет поднять критическую энергию выше энергии эксперимента, путем искажения дисперсионной функции. Такой подход не требует существенных затрат и делает возможным реализацию дуальной структуры для двух полноценных физических программ;
3. Численные исследования показали, что прохождение критической энергии может вызывать нестабильность продольного фазового движения. Использование процедуры скачка критической энергии может быть использовано для преодоления этой проблемы. Получены экспериментальные данные процедуры скачка критической с синхротрона У-70, которые находятся в соответствии с проведенным численными оценками с учетом высших порядков разложения коэффициента уплотнения орбиты и импедансов для различных интенсивностей сгустка;
4. Использование процедуры скачка критической энергии может быть ограничено его величиной, а также для темпом изменения градиентов в квадруполях арки по сравнению с темпом ускорения пучка. Рассмотрено различие применения гармонического и барьерного ВЧ на особенности рассмотренного скачка. Приведены оценки продольной микроволновой неустойчивости, показывающие существенное ограничение на параметры конечного сгустка.

5. Исследования спиновая динамики для возможности изучения ЭДМ заряженных частиц. Реализована концепция квази-замороженного спина с введением обводных каналов и сохранением изначального предназначения установки. На прямых участках предлагается расположение фильтров Вина для компенсации поворота спина под действием МДМ в магнитной арке.
6. Рассмотрена модернизированная структура синхротрона Nuclotron с сохранением функции бустера поляризованного пучка в коллайдер NICA. В предложенных 8/16-периодичных структурах возможно проведение независимых прецизионных экспериментов по исследованию ЭДМ дейтрана и протона, а также осуществлению поиска аксиона в режиме сканирующей антенны.

Проведенные исследования показывают особенности применения ускорительной техники для фундаментальных экспериментов.

В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Сеничеву Ю. В. за поддержку, помошь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит коллег Аксентьева А. Е. и Мельникова А. А. за помошь в регулярных обсуждениях и работе с образцами. Сотрудников ОИЯИ Лебедева В. А. за плодотворные дискуссии, Сыресина Е. М. и Ладыгина В. П. за поддержку в изучении установки Nuclotron-NICA.

Автор также благодарит директора ИФВЭ Иванова С. В. за возможность участия в сеансе на синхротроне У-70, а также сотрудников ОУК ИФВЭ Калинина В. А., Пашкова П. Т., Ермолаева А. Д. за всестороннюю помошь в проведении экспериментальных наблюдений.

Словарь терминов и аббревиатур

Transition energy критическая энергия;
Slip-factor коэффициент проскальзывания;
MCF (momentum compaction factor) коэффициент уплотнения орбиты;
NICA Nuclotron-based Ion Collider fAcility;
IBS (Intra-beam scattering) внутрипучковое рассеяние;
ppb (particles per bunch) количество частиц в пучке;
ppp (particles per period) количество частиц в периоде;
ВЧ Высокочастотная (станция);
Barrier Bucket Барьерная ВЧ;
SC (Space charge) пространственный заряд;
МДМ : Магнитный дипольный момент;
ЭДМ : Электрический дипольный момент;
Т-БМТ Томас-Баргаманн-Мишель-Телегди;
SCT (Spin Coherence Time) время спиновой когерентности;
QFS (Quasi-frozen spin) квази-замороженный спин;
FS (Frozen spin) замороженный спин;
WF Фильтры Вина;
bypass Обводные каналы.

Список литературы

1. *Bruce Roderik et al.* New physics searches with heavy-ion collisions at the CERN Large Hadron Collider // *J. Phys. G.* — 2020. — Vol. 47, no. 6. — P. 060501.
2. *Hahn H. et al.* The RHIC design overview // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2003. — Vol. 499. — Pp. 245–263.
3. Reliability of J-PARC accelerator system over the past decade / K. Yamamoto, K. Hasegawa, M. Kinsho et al. — Vol. 33. — P. 011016.
4. *Butenko A. V. et al.* Status of NICA Complex // *Phys. Part. Nucl. Lett.* — 2024. — Vol. 21, no. 3. — Pp. 212–217.
5. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR / Kh.U. Abraamyan, S.V. Afanasiev, V.S. Alfeev et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 2011. — Vol. 628, no. 1. — Pp. 99–102. — VCI 2010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021001483X>.
6. *Ladygin V. P.* Spin Physics Detector at NICA // *JPS Conf. Proc.* — 2022. — Vol. 37. — P. 011012.
7. *Ng K. Y.* Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities // U.S. Particle Accelerator School (USPAS 2002). — 2002. — 4.
8. *Lee Shyh-yuan.* Accelerator Physics (Fourth Edition). — World Scientific Publishing Company, 2018.
9. *Risselada T.* Gamma transition jump schemes // CERN Accelerator School: Course on General Accelerator Physics. — 1992. — Pp. 313–327.
10. *Möhl D.* Tech. Rep.: : CERN. — URL: <https://cds.cern.ch/record/310594>.
11. *Hardt W.* Gamma-Transition-Jump Scheme of the CPS // 9th International Conference on High-Energy Accelerators. — Pp. 434–438.
12. *Teng L C.* Infinite Transition Energy Synchrotron Lattice Using Pi straight Sections. — Vol. 4. — Pp. 81–85. — URL: <https://cds.cern.ch/record/1107910>.

13. Design method for high energy accelerator without transition energy / D. Trbojevic, D. Finley, R. Gerig, Stephen D. Holmes. — Vol. 900612. — Pp. 1536–1538.
14. *Senichev Yu. V., Chechenin A. N.* Theory of “Resonant”lattices for synchrotrons with negative momentum compaction factor // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* — 2007. — Vol. 105, no. 5. — Pp. 988–997. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063776107110118>.
15. *Senichev Yu. V., Chechenin A. N.* Construction of “resonant”magneto-optical lattices with controlled momentum compaction factor // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* — 2007. — Vol. 105, no. 6. — Pp. 1141–1156. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063776107120060>.
16. The New Lattices for the Boosterof Moscow KAON factory. — Vol. 2.
17. *Schonauer H. et al.* A slow-cycling proton driver for a neutrino factory. — Vol. 0006262. — Pp. 966–968.
18. Beam dynamics newsletter, no 11. — Pp. 11–13.
19. *Koseki T.* Status of J-PARC main ring synchrotron // Particle Accelerator Conference (PAC 07). — IEEE Nucl.Sci.Symp.Conf.Rec. — Pp. 736–738.
20. *Ptitsyn V.I., Shatunov Yu.M., Mane S.R.* Spin response formalism in circular accelerators. — Vol. 608, no. 2. — Pp. 225–233. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900209013333>.
21. *Bargmann V., Michel Louis, Telezdi V. L.* Precession of the Polarization of Particles Moving in a Homogeneous Electromagnetic Field // *Phys. Rev. Lett.* — 1959. — May. — Vol. 2. — Pp. 435–436. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.2.435>.
22. Transparent Spin Method for Spin Control of Hadron Beams in Colliders / Yu. N. Filatov, A. M. Kondratenko, M. A. Kondratenko et al. — Vol. 124. — P. 194801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.194801>.
23. *Sakharov A. D.* Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe // *Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* — 1967. — Vol. 5. — Pp. 32–35.

24. A New method of measuring electric dipole moments in storage rings / F. J. M. Farley, K. Jungmann, J. P. Miller et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2004. — Vol. 93. — P. 052001.
25. Quasi-frozen Spin Method for EDM Deuteron Search / Yurij Senichev, Serge Andrianov, Martin Berz et al. // 6th International Particle Accelerator Conference. — P. MOPWA044.
26. *Nikolaev N. N.* Spin of Protons in NICA and PTR Storage Rings as an Axion Antenna. — Vol. 115, no. 11. — Pp. 639–643. — URL: <https://doi.org/10.1134/S0021364022600653>.
27. MADX. — URL: <https://madx.web.cern.ch/>.
28. <http://www-bdnew.fnal.gov/pbar/organizationalchart/lebedev/OptiM/optim.htm>. — URL: <https://blond.web.cern.ch/>.
29. *Sagan D.* Bmad: A relativistic charged particle simulation library. — Vol. A558, no. 1. — Pp. 356–359. — Proceedings of the 8th International Computational Accelerator Physics Conference.
30. BLonD. — URL: <https://blond.web.cern.ch/>.
31. COSY Infinity. — URL: <https://www.cosyinfinity.org>.
32. (to be written) Dual-structure features for heavy ion and light particles at NICA collider / S.D. Kolokolchikov, A.E. Aksentyev, A.A. Melnikov, Yu.V. Senichev // *Chinese Physics C*. — 2025.
33. Formation of Polarized Proton Beams in the NICA Collider-Accelerator Complex / E. M. Syresin, A. V. Butenko, P. R. Zenkevich et al. // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2021. — Vol. 52, no. 5. — Pp. 997–1017. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779621050051>.
34. *Kolokolchikov S. D., Senichev Yu. V., Kalinin V. A.* Transition Energy Crossing in Harmonic RF at Proton Synchrotron U-70 // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 9. — Pp. 1355–1362. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377882410020X>.

35. Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF / S. D. Kolokolchikov, A. E. Aksentev, A. A. Mel'nikov, Yu. V. Senichev // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 10. — Pp. 1449–1454. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824100211>.
36. Longitudinal Dynamic in NICA Barrier Bucket RF System at Transition Energy Including Impedances in BLonD / S. Kolokolchikov, Yu. Senichev, A. Aksentev et al. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2024. — Vol. 21, no. 3. — Pp. 419–424. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1547477124700389>.
37. Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex / S. Kolokolchikov, Y. Senichev, A. Melnikov, E. Syresin // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2023. — Vol. 2420, no. 1. — P. 012001. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012001>.
38. Transition Energy Crossing of Polarized Proton Beam at NICA / S. Kolokolchikov, Yu. Senichev, A. Aksentev et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 3. — Pp. 212–215. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700054>.
39. Kolokolchikov S. D., Senichev Y. V. Magneto-Optical Structure of the NICA Collider with High Transition Energy // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Vol. 84, no. 10. — Pp. 1734–1742. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778821100185>.
40. Kolokolchikov S., Senichev Yu. Peculiarities of Crossing and Raising the Synchrotron Transition Energy // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 10. — Pp. 2260–2264. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110236>.
41. Quasi-frozen spin concept of magneto-optical structure of NICA adapted to study the electric dipole moment of the deuteron and to search for the axion / Y. Senichev, A. Aksentev, S. Kolokolchikov et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2023. — Vol. 2420, no. 1. — P. 012052. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2420/1/012052>.
42. Consideration of an Adapted Nuclotron Structure for Searching for the Electric Dipole Moment of Light Nuclei / Yu. V. Senichev, A. E. Aksentev,

- S. D. Kolokolchikov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 11. — Pp. 2434–2438. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110418>.
43. (to be written) Modernization of Nuclotron as booster for NICA and EDM experiment / S.D. Kolokolchikov, A.E. Aksentyev, A.A. Melnikov, Yu.V. Senichev // *JETP Letters*. — 2025.
 44. Designing Bypass Channels in NICA Accelerator Complex for Polarized Beam Experiments for EDM Search / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 11. — Pp. 2423–2428. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778823110248>.
 45. ByPass optics design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2024. — Vol. 2687, no. 2. — P. 022026. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022026>.
 46. NICA Facilities for the Search for EDM Light Nuclei / Yu. Senichev, A. Aksentyev, S. Kolokolchikov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2024. — Vol. 87, no. 4. — Pp. 436–441. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778824700534>.
 47. Spin Coherence and Betatron Chromaticity of Deuteron Beam in “Quasi-Frozen”Spin Regime / S. Kolokolchikov, A. Aksentiev, A. Melnikov, Yu. Senichev // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2023. — Vol. 86, no. 12. — Pp. 2684–2688. — URL: <https://doi.org/10.1134/S106377882311025X>.
 48. Spin coherence and betatron chromaticity of deuteron beam in NICA storage ring / S. Kolokolchikov, A. Aksentyev, A. Melnikov, Y. Senichev // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2024. — Vol. 2687, no. 2. — P. 022027. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2687/2/022027>.
 49. Trubnikov Grigory, Sidorin Anatoly, Shurkhno Nikolay. NICA cooling program // *Cybern. Phys.* — 2014. — Vol. 3, no. 3. — Pp. 137–146.
 50. Physics and Technique of Stochastic Cooling / Dieter Mohl, G. Petrucci, L. Thorndahl, Simon Van Der Meer // *Phys. Rept.* — 1980. — Vol. 58. — Pp. 73–119.
 51. Mohl Dieter. The Status of stochastic cooling // *Nucl. Instrum. Meth. A*. — 1997. — Vol. 391. — Pp. 164–171.

52. *Caspers F., Möhl D.* Stochastic Cooling In Hadron Colliders // 17th International Conference on High-Energy Accelerators. — 1998. — Pp. 398–401.
53. *Church Mike.* Stochastic cooling at Fermilab // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* — 1997. — Vol. 391, no. 1. — Pp. 172–175. — Proceedings of the Eleventh International Advanced ICFA Beam Dynamic Workshop on Beam Cooling and Instability Damping Dedicated to the 30th Anniversary of Electron Cooling on board a ship from Moscow to Nizhny Novgorod. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900297003586>.
54. *Senichev Y.* Advanced HESR Lattice with Non-Similar Arcs for Improved Stochastic Cooling // Proc. COOL'07. — JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2007. — Pp. 102–105. — URL: <https://jacow.org/cl07/papers/TUA2C07.pdf>.
55. *Antoniou F, Zimmermann F.* Tech. Rep.: — Geneva: CERN, 2012. — URL: <https://cds.cern.ch/record/1445924>.
56. *Костромин С.А. Мешков И.Н. Сидорин А.О. Смирнов А.В. Трубников Г.В. Шурхно Н.А.* Применение методов охлаждения пучков в проекте NICA // Письма в ЭЧАЯ. — 2012. — Vol. 9, no. 4-5(174-175). — Pp. 537–562.
57. *Métral E., Möhl D.* Transition crossing. — Vol. 1, no. CERN-2011-004. — P. 59.
58. *at al. R. Ainsworth.* Transition Crossing in the Main Injector For PIP-II. — URL: [FERMILAB-CONF-17-143-AD](https://ferrilab-conf-17-143-ad).
59. *Pashkov P. T.* Measuring inductive component of longitudinal coupling impedance in IHEP PS using gamma-transition jump // 19th Russian Accelerator Conferences. — 2004. — 10.
60. *Stockhorst H.* Beam Cooling at COSY and HESR: Ph.D. thesis. — 2016.
61. *Autin B.* DISPERSION SUPPRESSION WITH MISSING MAGNETS IN A FODO STRUCTURE - APPLICATION TO THE CERN ANTI-PROTON ACUMULATOR. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 1979. — Vol. 26. — Pp. 3493–3495.
62. *Laclare J. L.* Coasting beam longitudinal coherent instabilities // CERN Accelerator School: Course on General Accelerator Physics. — 1992. — Pp. 349–384.

63. *J. Wei S. Y. Lee.* Space Charge Effect at Transition Energy and the Transfer of R.F. System at Top Energy. — 2021. — URL: [BNL-41667](#).
64. *A. Черный C.* Ускорительный комплекс ИФВЭ // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 1991. — Vol. 22, no. 5. — P. 1067.
65. Barrier Station RF1 of the NICA Collider. Design Features and Influence on Beam Dynamics / A.M. Malyshev, O.I. Brovko, A.A. Krasnov et al. // Proc. RuPAC'21. — Russian Particle Accelerator Conference no. 27. — JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, 2021. — 09. — Pp. 373–375. — <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC15>. URL: <https://jacow.org/rupac2021/papers/wepsc15.pdf>.
66. *Vadai Mihaly.* Beam Loss Reduction by Barrier Buckets in the CERN Accelerator Complex. — CERN, Geneva, 2021.
67. *Meshkov I. N.* Luminosity of an Ion Collider // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2019. — Vol. 50, no. 6. — Pp. 663–682. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063779619060042>.
68. *П.Р. Зенкевич.* Исследование устойчивости интенсивных протонных пучков, в коллайдере NICA.
69. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson / J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay. — Vol. 13. — Pp. 138–140. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.13.138>.
70. *Lee T. D.* A Theory of Spontaneous T Violation. — Vol. 8. — Pp. 1226–1239. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.8.1226>.
71. *Höcker Andreas, Ligeti Zoltan.* CP Violation and the CKM Matrix. — Vol. 56, no. Volume 56, 2006. — Pp. 501–567. — URL: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.nucl.56.080805.140456>.
72. *Baluni Varouzhan.* CP-nonconserving effects in quantum chromodynamics. — Vol. 19. — Pp. 2227–2230. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.19.2227>.
73. *Pretz Jörg.* Electric Dipole Moment (EDM) searches for leptons and hadrons. — Vol. HQL2023. — P. 010.

74. *Purcell E. M., Ramsey N. F.* On the Possibility of Electric Dipole Moments for Elementary Particles and Nuclei. — Vol. 78. — Pp. 807–807. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.78.807>.
75. *Smith J. H., Purcell E. M., Ramsey N. F.* Experimental Limit to the Electric Dipole Moment of the Neutron. — Vol. 108. — Pp. 120–122. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.108.120>.
76. Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron / C. Abel, S. Afach, N. J. Ayres et al. — Vol. 124. — P. 081803. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.081803>.
77. *Ehrenfest P.* Bemerkung über die angenäherte Gültigkeit der klassischen Mechanik innerhalb der Quantenmechanik. — Vol. 45, no. 7. — Pp. 455–457. — URL: <https://doi.org/10.1007/BF01329203>.
78. *Fukuyama Takeshi, Silenko Alexander J.* Derivation of Generalized Thomas-Bargmann-Michel-Telegdi Equation for a Particle with Electric Dipole Moment // *Int. J. Mod. Phys. A.* — 2013. — Vol. 28. — P. 1350147.
79. *Abusaif F. et al.* Storage ring to search for electric dipole moments of charged particles: Feasibility study. — CERN.
80. *Chislett Rebecca.* The muon EDM in the g-2 experiment at Fermilab. — Vol. 118. — P. 01005.
81. Frequency domain method of the search for the deuteron electric dipole moment in a storage ring with imperfections / Yury Senichev, Alexander Aksentev, Andrey Ivanov, Eremey Valegov. — 2017. — 11.
82. *Baldin A., Kovalenko A.* — The Status of the Dubna Relativistic Heavy Ion Accelerator Facility. — CERN bulletin, Geneva, 14/93 edition, 1993.
83. The technology behind the production of different NICA Collider magnets / Sergey Korovkin, Yuri Bespalov, Vladimir Borisov et al. // 27th Russian Particle Accelerator Conference. — 2021. — 10.
84. *Anastassopoulos D. et al.* AGS proposal: Search for a permanent electric dipole-moment of the deuteron nucleus at the 10^{-29} e cm level. — 2008.

85. *Aggarwal A., Magiera A.* Controlling Systematic Uncertainties in Search for an EDM in the Storage Ring. — Vol. 51. — P. 373.
86. *Müller F. et al.* A new beam polarimeter at COSY to search for electric dipole moments of charged particles // *JINST*. — 2020. — Vol. 15, no. 12. — P. P12005.
87. *Skhomenko Ya. T. et al.* Deuteron beam polarimeter at Nuclotron internal target // *EPJ Web Conf.* — 2019. — Vol. 204. — P. 10002.
88. *Kovalenko Alexander et al.* Nuclotron at JINR: Operation Experience and Recent Development // 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology. — 2016. — P. MOPA19.
89. Spin Tune Decoherence Effects in Electro- and Magnetostatic Structures / Yurij Senichev, Rudolf Maier, Denis Zyuzin, Natalia Kulabukhova // 4th International Particle Accelerator Conference. — 2013. — Pp. 2579–2581.
90. *Senichev Y., Aksentyev A., Melnikov A.* Spin Chromaticity of Beam: Orbit Lengthening and Betatron Chromaticity // *Physics of Atomic Nuclei*. — 2021. — Vol. 84, no. 12. — Pp. 2014–2017. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1063778821100367>.
91. How to Reach a Thousand-Second in-Plane Polarization Lifetime with 0.97–GeV/c Deuterons in a Storage Ring / G. Guidoboni, E. Stephenson, S. Andrianov et al. — Vol. 117. — P. 054801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.117.054801>.

Список рисунков

1.1 Регулярная ФОДО структура.	25
1.2 Резонансная магнитооптическая структура с повышенной критической энергией.	26
1.3 Резонансная магнитооптическая структура с реальной и комплексной критической энергией в арках.	27
1.4 Зависимость времени стохастического охлаждения от энергии для разных структур.	27
1.5 Зависимость постоянной времени разогрева пучка из-за внутрипучкового рассеяния в регулярной, «резонансной» и комбинированной структурах от энергии пучка.	29
2.1 Твист-параметры $\beta_{x,y}$, D_x . Сверху – для ячеек для сигнэтной ФОДО, дублетной ФДО, триплетной ОДФДО ячеек; посередине – регулярная структура; снизу – резонансная.	32
2.2 а) Классическая синхротронная частота и темп изменения огибающей сепаратрисы в окрестности критической энергии от номера оборота; б) изменение первого и второго порядка коэффициента проскальзывания η_0 , $\eta_1\delta$ в окрестности критической энергии от номера оборота.	36
2.3 Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 7 до 13 ГэВ для трёх моделей без скачка и учёта импеданса. Синяя – учёт только первого порядка $\eta = \eta_0$, ‘simple’ solver, оранжевая – $\eta = \eta_0$, ‘exact’ solver, зеленая – $\eta = \eta_0 + \eta_1\delta$, ‘exact’ solver.	37
2.4 Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 7 до 9 ГэВ без скачка, с учётом различного вида импеданса и интенсивностей.	40
2.5 Твист-параметры β_x, β_y, D_x для суперпериода У-70 а) регулярная структура; б) структура с модулированной дисперсией.	41
2.6 а) Поднятие критической энергии при процедуре скачка; б) соответствующее изменение первого порядка коэффициента скольжения η_0	42

2.7 а) Скачок критической энергии на сеансе У-70. Зеленая линия – сигнал с фазового датчика, фиолетовая – градиент в обмотках дополнительных квадрупольей, голубая – сигнал с пикового детектора; б) Продольная линейная плотность сгустка относительно фазы ВЧ в момент скачка.	42
2.8 Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 6.9 до 12.9 ГэВ для трёх моделей со скачком, без учёта импеданса. Синяя – учёт только первого порядка $\eta = \eta_0$, ‘simple’ solver, оранжевая – $\eta = \eta_0$, ‘exact’ solver, зеленая – $\eta = \eta_0 + \eta_1\delta$, ‘exact’ solver.	43
2.9 Зависимость а) длины сгустка, б) разброса энергии внутри сгустка, в) продольного эмиттанса от номера оборота в окрестности критической энергии при изменении энергии от 6.9 до 8.9 ГэВ со скачком, с учётом различного вида импеданса и интенсивностей. . .	43
2.10 Изменение длины сгустка в ходе ускорительного цикла на сеансе У-70.	45
2.11 Зависимость критической энергии и рабочей точки от возмущения градиента квадрупольных линз.	46
2.12 Зависимость высших порядков разложения коэффициента расширения орбиты от критической энергии.	47
2.13 Зависимость бетатронной частоты в x , y – плоскости от критического значения Лоренц-фактора γ_{tr} при модуляции дисперсионной функции изменением градиента в фокусирующих линзах.	47
2.14 Динамические апертуры (x –плоскость слева, y –плоскость справа) для различных (а-г) рабочих точек с $\frac{dp}{p} = 0$	49
2.15 а) Принципиальная схема поднятия критической энергии на NICA в гармоническом ВЧ с темпом $(d\gamma/dt)_{RF2} = 30 \text{ c}^{-1}$ при процедуре скачка на $\Delta\gamma_{tr} = 0.09$ с темпом $d\gamma_{tr}/dt = 8.5 \text{ c}^{-1}$; б) соответствующее изменение первого порядка коэффициента скольжения $\eta_0 = \pm 1 \times 10^{-3}$	50
2.16 Изменение первого порядка коэффициента скольжения η_0 при процедуре скачка с использованием барьерного ВЧ.	52

2.17 Слева – импеданс пространственного заряда; справа – Напряжение, создаваемое пространственным зарядом вдоль профиля пучка в продольной плоскости.	52
2.18 Схема скачка критической энергии. Синяя линия – фактическая критическая энергия ускорителя γ_{tr} , красная линия – энергия референсной частицы.	53
2.19 Нормализованная форма сигнала от ВЧ барьера.	54
2.20 Разложение сигнала от ВЧ барьерного типа в ряд Фурье по синусоидальным гармоникам. Слева – форма ВЧ барьеров, справа – амплитуды гармоник в зависимости от частоты для разной ширины отражающего барьера.	55
2.21 Фазовая плоскость при удержании пучка внутри ВЧ-барьера. Слева – начальное распределение, справа – распределение после 2×10^5	55
2.22 Фазовая плоскость при скачке, ВЧ-барьеры отключены. Слева – начальное распределение, справа – распределение после 6×10^3 оборотов.	56
2.23 Зависимость количества частиц в барьерном ВЧ и разброса по импульсам от длины между удерживающими барьерами с точки зрения продольной микроволновой неустойчивости.	59
2.24 Изменение поляризации во время процедуры скачка критической энергии: (а) ускорение на этапе 2, (б) скачок на этапе 3.	59
 3.1 Суперпериод, состоящий из 3-х ФОДО ячеек. QF1, QF2 – фокусирующие квадруполи, QD – дефокусирующие квадруполи, B – поворотный магнит.	66
3.2 Твист-параметры $\beta_{x,y}$, D_x . Сверху – для ячеек для сигнэтной ФОДО, дублетной ФДО, триплетной ОДФДО ячеек; посередине – регулярная структура; снизу – резонансная.	67
3.3 Твист-параметры 3-х ячеек. Слева – регулярная структура без модуляции, справа – модулированная с введением суперпериодичности, глубина модуляции 24%.	68
3.4 Подавление дисперсии в тяжелоионной структуре.	69
3.5 Подавление дисперсии в регулярной структуре.	71
3.6 Подавление дисперсии в тяжелоионной структуре.	72
3.7 Подавление дисперсии в тяжелоионной структуре.	73

3.8	Динамическая аппретура для случая плавления дисперсии крайними квадруполями. Слева – x-плоскость; справа – y-плоскость.	74
3.9	Динамическая апертура в случае подавление дисперсии двумя семействами квадруполей. Слева – x-плоскость; справа – y-плоскость.	75
4.1	Схематическое изображение нарушение Р- и Т-симметрии ненулевым электрическим дипольным моментом.	78
4.2	Вращение положительно заряженной частицы а) в магнитном поле; б) электростатическом поле.	82
4.3	Отношение спин-тюнов $\kappa = \frac{v_{B\perp}}{v_E}$ поперечного магнитного и электрического поля для дейтрона и протона.	87
4.4	Зависимость длины компенсирующего элемента в зависимости от энергии сгустка на нуклон.	88
4.5	Принципиальная схема одного периода квази-замороженной структуры с фильтрами Вина для а. дейтронов, б. протонов.	90
4.6	Принципиальная схема одного периода квази-замороженной структуры с электростатическими дефлекторами для а. дейтронов, б. протонов.	91
4.7	Принципиальная схема расстановки структуры Nuclotron с текущей расстановкой элементов и с введением электростатических дефлекторов.	96
4.8	Твист-функции текущей регулярной структуры Nuclotron.	96
4.9	Принципиальная схема расстановки восьмипериодической структуры Nuclotron с текущей расстановкой при введении электростатических дефлекторов.	98
4.10	Твист-функции регулярной поворотной арки восьмипериодической модернизированной структуры Nuclotron.	98
4.11	Твист-функции регулярной поворотной арки восьмипериодической модернизированной структуры Nuclotron с дефлекторами.	99
4.12	Принципиальная схема расстановки восьмипериодической структуры Nuclotron с текущей расстановкой при введении электростатических дефлекторов.	99
4.13	Твист-функции 16-периодической модернизированной структуры Nuclotron без фильтров Вина.	100

4.14 Твисс-функции 16-периодической модернизированной структуры Nuclotron с фильтрами Вина.	100
4.15 Принципиальная схема обходных каналов bypass в существующем комплексе NICA.	103
4.16 Принципиальная схема bypass с 3 квадруполями.	104
4.17 Twiss-параметры для bypass с 3 квадруполями. Черными линиями показано расположение дефлекторов.	104
4.18 Принципиальная схема ByPass с 5 квадруполями.	105
4.19 Твисс-параметры для bypass с 5 квадруполями. Черными линиями показано расположение дефлекторов.	105
4.20 Принципиальная схема адаптированной структуры кольца NICA с bypass.	106
4.21 Твисс-функции для половины адаптированной структуры кольца NICA с bypass. Фильтры Вина, расположенные на прямом участке.	106
4.22 Траектория спина в половине модернизированного кольца bypass NICA. Арка и прямая секция с фильтрами Вина ((обозначены красными пунктирными линиями). Вертикально поляризованная частица \vec{S} (0,0,1). Показана зависимость S_x , S_y и S_z от номера элемента (длины).	107
4.23 Твисс-параметры bypass NICA для дейтронного режима в OptiM. Также показано расположение секступольных семейств.	109
4.24 Зависимость частоты прецессии спина от координат x, y, d для различных случаев оптимизации. NC – натуральная хроматичность (красная линия); BC – нулевая (бетатронная) хроматичность (синяя пунктирная линия); SC – спиновая когерентность (зеленая линия); BC_α – нулевая хроматичность и $\alpha_1 = 0$ (фиолетовая линия); BC_{eta} – нулевая хроматичность и ноль $\eta_1 = 0$ (светло-голубая линия).	110
4.25 Спиновый трекинг частиц с различным начальным отклонением в координатах x, y, d с использованием 2 семейств секступолей для получения нулевой бетатронной хроматичности.	111
4.26 Спиновый трекинг частиц с различным начальным отклонением в координатах x, y, d с использованием 3 семейств секступолей для получения спиновой когерентности.	112

Список таблиц

1	Основные параметры магнитооптических структур.	29
2	Основные параметры кольца и ВЧ для У-70	37
3	Результаты численного моделирования прохождения критической энергии, в том числе с учётом влияния различных импедансов для различных интенсивностей.	39
4	Изменение рабочей точки в процессе процедуры скачка критической энергии на У-70.	42
5	Результаты численного моделирования прохождения критической энергии скачком с учетом влияния различных импедансов для различных интенсивностей.	44
6	Значение угла магнитного поля и коэффициент отличия FS от QFS для разного сорта частиц и периодичности.	87
7	Параметры частиц и эксперимента.	88
8	Параметры структур Nuclotron.	101
9	Сравнение параметров с различной вариацией оптимизации оптимизацией.	113