

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

Член-корреспондент РАН

И.Н.Мешков

Кандидат физико-математических наук

П.Ф.Белошицкий

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук

Л.М.Онищенко

(ЛЯП ОИЯИ)

Кандидат технических наук

В.Н.Корчуганов

(ИЯФ им.Г.И.Будкера СО РАН)

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Защита диссертации состоится _____ 2002 г. в
"_____" часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в
Объединенном институте ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "_____" _____ 2002 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор физико-математических наук

Ю.А.Батусов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Синхротронное излучение (СИ) релятивистских электронов (позитронов) находит широкое применение во многих областях науки. Его использование принципиально расширило возможности экспериментальных методов исследования в атомной и молекулярной физике, физике твердого тела, химии, в прикладных науках, таких как материаловедение, медицинская диагностика, микроэлементный анализ. Синхротронное излучение открыло возможности реализации принципиально новых технологий, таких как рентгеновская литография, LIGA-технологии и многих других.

В 1999 г. по соглашению между ОИЯИ и Национальным институтом ядерной физики и физики высоких энергий NIKHEF (Амстердам, Голландия) был безвозмездно передан в Дубну ускорительный комплекс, включающий в себя электронный линейный ускоритель MEA (Medium Energy Accelerator) на энергию электронов 700 МэВ и накопительное кольцо AmPS (Amsterdam Pulse Stretcher) с максимальной энергией электронов 900 МэВ при токе накопленного пучка 200 мА. В ОИЯИ на основе этого ускорительного комплекса планируется создать современный источник СИ ДЭЛСИ (Дубненский электронный синхротрон) с энергией электронов 1,2 ГэВ при токе накопленного пучка 300 мА. Накопительное кольцо ДЭЛСИ проектируется на основе элементов кольца AmPS, но с существенным изменением его оптики. Кольцо будет дополнено ондулятором с высокой яркостью и сверхпроводящим вигглером, генерирующим высокоэнергетическое рентгеновское излучение. Энергия электронов будет увеличена путем модификации дипольных магнитов AmPS (первый модифицированный дипольный магнит уже прошел магнитные измерения).

Для достижения современных параметров излучения при относительно небольшой энергии электронного пучка и малых размерах накопителя необходим прежде всего малый эмиттанс. Это налагает достаточно жесткие требования на магнитную структуру накопителя. Кроме того, уменьшение эмиттанса создает ряд

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

проблем, связанных с динамической апертурой: для достижения хорошего значения времени жизни и для эффективной инжекции динамическая апертура должна быть достаточно велика, в то время как уменьшение эмиттанса ведет к ее уменьшению. Энергия электронов в накопителе ДЭЛСИ сравнительно небольшая, поэтому для получения хорошей яркости необходимо применение встроенных устройств, которые в свою очередь оказывают серьезное воздействие на электронный пучок. Необходима компенсация их влияния, в первую очередь для того, чтобы эмиттанс при включении вигглера увеличивался не слишком сильно.

В настоящее время в 19 странах мира 53 лаборатории ведут исследования на СИ. В них работают, строятся или проектируются около 73 накопительных колец – источников СИ. Из них 40 работают, 10 – в стадии строительства, остальные находятся на различных этапах разработки в ожидании финансирования. В Западной Европе работают пять источников СИ третьего поколения с энергией порядка 1-2 ГэВ. В России, однако, существуют только два источника СИ – ВЭПП-3 (ИЯФ им.Г.И.Будкера, Новосибирск) и Сибирь-2 (РНЦ КИ, г.Москва). Благодаря готовым элементам магнитной структуры накопителя AmPS, есть возможность создать недорогой новый накопитель – источник СИ с лучшими на сегодняшний день параметрами излучения в России и не уступающий по параметрам зарубежным накопителям с энергией электронов в пределах 1-2,5 ГэВ. В связи с вышесказанным, настоящая работа является полезной и актуальной.

Основные цели работы

Данная работа имела целью разработку магнитной структуры накопительного кольца источника СИ ДЭЛСИ и анализ динамики пучка электронов в накопителе с целью получения максимально яркого излучения из поворотных магнитов и из встроенных устройств для проведения широкого спектра научных и прикладных исследований.

Научная новизна

Впервые предложена и рассчитана магнитная структура накопителя с низкой энергией электронов и со встроенным сильнополюсным вигглером с магнитным полем 10 Тл, позволяющая сформировать пучок электронов с эмиттансом 11,4 нм-рад, что обеспечивает высокую яркость излучения. По своим параметрам предложенный накопитель является источником СИ третьего поколения. Найден способ компенсации влияния вигглера на структурные функции. Определены требования к вигглеру, выполнение которых (при его изготовлении) позволит уменьшить нежелательные эффекты, прежде всего, рост эмиттанса.

Практическая ценность работы

Разработанная магнитная структура позволяет создать современный источник СИ третьего поколения ДЭЛСИ на энергию электронов 1,2 ГэВ со встроенным вигглером с магнитным полем 10 Тл.

На защиту выносятся:

Магнитная структура накопителя электронов – источника СИ с компенсацией сильного возмущения, вносимого вигглером с магнитным полем 10 Тл.

1. Предложена и оптимизирована магнитная структура накопительного кольца, обеспечивающая:
 - 1.1. накопление и формирование пучка электронов с энергией 1,2 ГэВ, горизонтальным эмиттансом 11,4 нм при длине сгустка 8,74 мм;
 - 1.2. яркость СИ из поворотных магнитов $3,3 \cdot 10^{14}$ фотон/(с·мм²·мрад²·0,1% ш.п.);
 - 1.3. возможность размещения встроенных устройств – вигглера с магнитным полем 10 Тл и ондулятора с магнитным полем 0,75 Тл длиной 2,25 м с оптимизированными величинами бета-функций для получения максимальной яркости излучения и без существенного возмущения динамики пучка;

- 1.4. корректировку искажений замкнутой орбиты имеющимся в наличии набором корректоров в пределах ожидаемых ошибок полей в элементах структуры;
- 1.5. время жизни пучка около пяти часов.
2. Выбрано оптимальное значение бетатронных частот Q_x , Q_z (рабочая точка), обеспечивающее максимально возможные размеры области устойчивого движения электронов в накопителе ДЭЛСИ.
3. Сформулированы требования к специализированному вигглеру с магнитным полем 10 Тл для накопительного кольца ДЭЛСИ.
4. Показано, что магнитная структура обладает достаточной для эффективной инжекции динамической апертурой и при включенных встроенных устройствах обеспечивает необходимое значение времени жизни пучка. Проведен анализ влияния ошибок на параметры накопителя.
5. Выбрана и оптимизирована магнитная структура транспортировочного канала, обеспечивающая эффективную транспортировку электронного пучка из линейного ускорителя в накопительное кольцо с использованием элементов канала транспортировки пучка накопителя AmPS.
6. Предложена схема инжекции, обеспечивающая эффективное накопление электронного пучка с током до 300 мА на энергию электронов 0,8 ГэВ. Проведен расчет параметров основных элементов инжекции – септума и кикеров.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на Американской конференции по ускорителям PAC'2001 (США, 2001 г.), международной конференции по ядерной и радиационной физике ICNRP'2001 (Казахстан, 2001 г.), Европейской конференции по ускорителям EPAC'2000 (Австрия, 2000 г.), Международной конференции по использованию синхротронного излучения SR'2000

(г.Новосибирск, 2000 г.), на Международной конференции SRI'2000 (Германия, 2000 г.), XVII Всероссийском совещании по ускорителям заряженных частиц (г.Протвино, 2000 г.), первом и втором Международном рабочем совещании «Синхротронный источник ОИЯИ: перспективы исследований» (г.Дубна, 1999, 2001 гг.), на четвертой, пятой и шестой конференциях молодых ученых и специалистов (г.Дубна, 2000, 2001, 2002 гг.), на третьем научном семинаре памяти В.П.Саранцева (г.Дубна, 1999 г.), неоднократно обсуждались на научных семинарах в Объединенном институте ядерных исследований.

Публикации

Результаты исследований, составившие основу диссертации, опубликованы в 12 печатных работах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, четырех приложений и списка литературы из 105 наименований. Общий объем: 172 страницы.

Содержание диссертационной работы

Содержание работы изложено в пяти главах.

В главе 1 дано краткое описание характеристик синхротронного излучения из поворотных магнитов и встроенных устройств, приведены результаты расчетов характеристик синхротронного излучения из поворотных магнитов, вигглера и ондулятора накопительного кольца ДЭЛСИ, проведено сравнение параметров синхротронного излучения ДЭЛСИ с аналогичными параметрами Российского источника синхротронного излучения Сибирь-2 (г. Москва), и зарубежных – BESSY II (Германия), MAX II (Швеция).

Характеристики синхротронного излучения из поворотных магнитов, вигглера и ондулятора накопителя ДЭЛСИ были рассчитаны с помощью программы SynRad, разработанной в Стэнфордском университете.

Параметры синхротронного излучения из поворотных магнитов накопительного кольца ДЭЛСИ позволяют реализовать широкую программу исследований по атомной фотоэлектронной спектроскопии, люминесценции в области вакуумного ультрафиолетового излучения, по физике рентгенолюминофоров и сцинтилляторов, флуоресцентной спектроскопии биологических объектов с высоким временным разрешением в области мягкого рентгеновского излучения. Для этого планируется создать 8 каналов СИ. Будет создан метрологический канал для фотометрических измерений детекторов и дозиметров, применяемых во многих областях науки и техники, в том числе в космических исследованиях.

Использование сверхпроводящего трехполюсного вигглера («шифтера») с напряженностью магнитного поля 10 Тл на накопительном кольце ДЭЛСИ обеспечит генерацию жесткого рентгеновского излучения. Для работы с ним в накопителе ДЭЛСИ будет создано 6 каналов. Излучение будет использовано для структурных исследований биологических объектов с временным разрешением, для рентгеновской микроскопии для исследований ВУФ-люминесцентных кристаллов, для получения ВУФ-генерации твердотельных лазеров при накачке СИ, для исследований в области мессбауэровской спектроскопии с временным разрешением, EXAFS-спектроскопии, кристаллографии.

На накопительном кольце ДЭЛСИ планируется установить миниюндулятор с минимальным зазором 5 мм. Расчетная максимальная яркость излучения из ондулятора достигает $1,97 \cdot 10^{19}$ фотон/(с·мм²·мрад²·0,1% ш.п.). На первом этапе планируется создание двух каналов для работы с излучением из ондулятора ДЭЛСИ. Излучение можно использовать для исследований в области метрологии и фотометрии, кристаллографии, рентгеновской голографии, для накачки твердотельных ВУФ-лазеров.

Сравнив спектральные характеристики различных источников синхротронного излучения с энергией, близкой к энергии накопительного кольца

ДЭЛСИ (рис.1) можно увидеть, что по своим параметрам накопительное кольцо вполне конкурентно способно в России и не уступает зарубежным источникам СИ.

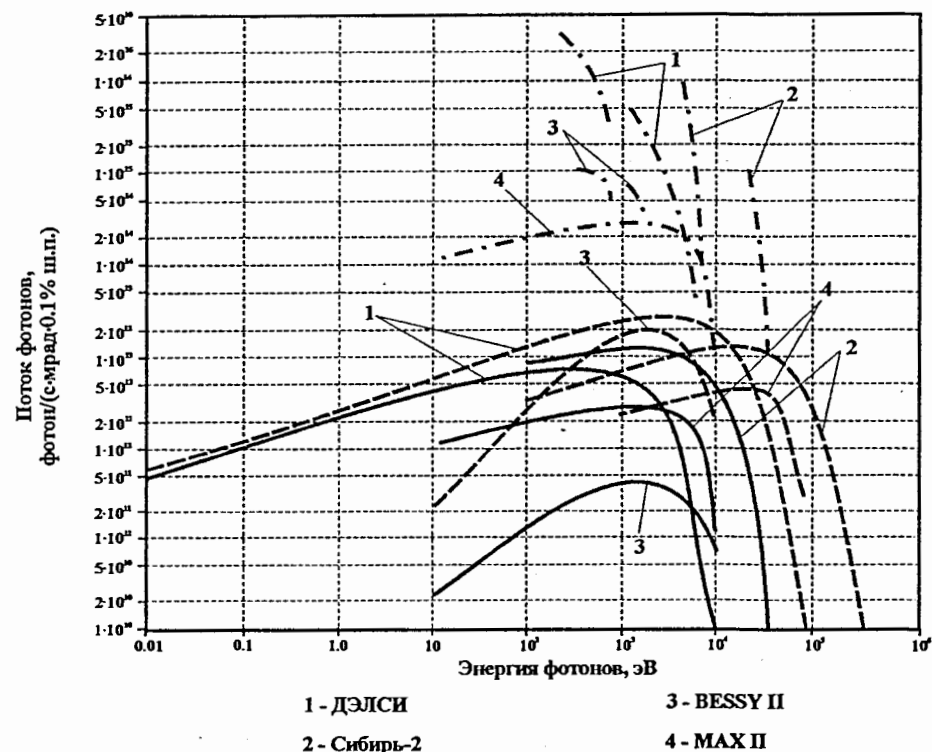


Рис.1. Спектральные характеристики излучения для Сибирь-2 (Россия), ДЭЛСИ (Россия), BESSY II (Германия), MAX II (Швеция): излучение из поворотных магнитов – сплошные линии, излучение из вигглеров – пунктирные, излучение из ондуляторов – штрихпунктирные линии

Глава 2 посвящена выбору магнитной структуры накопительного кольца ДЭЛСИ, которая позволяет получить малый эмиттанс и высокую яркость излучения. В этой главе приведены общие соображения по выбору магнитной структуры накопителя – источника СИ с учетом специфических требований, налагаемых использованием оборудования накопительного кольца AmPS. Описаны результаты расчета двух магнитных структур: одна из них имеет восемь прямолинейных промежутков для встроенных устройств, другая – четыре прямолинейных промежутка. Предпочтение отдано структуре с четырьмя прямолинейными промежутками. Приведено обоснование данного выбора. Проведен выбор рабочей точки накопительного кольца с учетом величины динамической апертуры.

На выбор структуры накопительного кольца ДЭЛСИ повлияли как общие требования (как к источнику синхротронного излучения), так и специфические. К общим требованиям относятся минимизация эмиттанса, наличие большой динамической апертуры для требуемого значения времени жизни пучка и для эффективной инжекции, а также компенсация влияния встроенных устройств на основные параметры кольца. Специфика накопительного кольца ДЭЛСИ состоит в том, что необходимо использовать элементы магнитной структуры накопительного кольца AmPS с минимальными переделками, изготовление дополнительных элементов максимально ограничено.

Варианты магнитных структур накопительных колец – источников СИ, в которых достигается минимальный эмиттанс, можно поделить на два класса: структуры без дополнительных поворотных магнитов на дисперсионных участках (структура Чэсмэна-Грина, расширенная структура Чэсмэна-Грина (DBA)) и структуры с дополнительными поворотными магнитами на дисперсионных участках (ТВА, МВА).

Достоинствами структуры Чэсмэна-Грина (DBA) является получение относительно большой дисперсионной функции между поворотными магнитами, что позволяет получить достаточно большую динамическую апертуру. Однако, в этой структуре набег фазы между поворотными магнитами равен π . Это ограничивает возможности структуры, так как значения бета-функций в местах

установки встроенных устройств связаны с выбором частот бетатронных колебаний.

ТВА-структура дает возможность менять набег фаз между крайними магнитами от π до 2π путем изменения длины центрального магнита. Для уменьшения эмиттанса, необходимо уменьшить дисперсию в центральном магните, что повлечет за собой присутствие в структуре сильных секступольных линз. В ТВА-структуре силы секступольных линз в два-три раза выше, чем в DBA-структуре с таким же эмиттансом. Кроме того, недостатком ТВА-структуры является то, что при ее использовании периметр кольца возрастает.

Добавляя еще один дипольный магнит в дисперсионную область, можно построить QBA-структуру. Достоинством QBA-структуры является то, что в ней эмиттанс почти в два раза меньше, чем для DBA-структуры, однако при ее использовании уменьшается количество прямолинейных бездисперсионных промежутков для встроенных устройств.

По аналогии, добавляя поворотные магниты в дисперсионную область, можно получить МВА-структуру (multi-bend achromat).

Расчет структурных функций накопительного кольца ДЭЛСИ проводился с помощью программ MAD (CERN, Швейцария) и OPA (модифицированный вариант программы OPTICK, разработанной в PSI, Швейцария). Сравнение показало хорошее совпадение результатов.

Для DBA-структуры кольца ДЭЛСИ с восьмью прямолинейными промежутками элемент периодичности состоит из четырех дипольных магнитов, установленных попарно, и восьми квадрупольных линз. Структурные функции квадранта кольца показаны на рис.2, основные параметры кольца приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры накопительного кольца ДЭЛСИ с восьмью прямолинейными промежутками

Энергия электронного пучка, ГэВ	1,2
Периметр, м	123,99
Радиус кривизны траектории в поворотных магнитах, м	3,3
Коэффициент расширения орбиты	$5,67 \cdot 10^{-3}$
Хроматичность (гор./верт.)	-30,3/-16,7
Горизонтальный эмиттанс, нм·рад	19,5
Частоты бетатронных колебаний (гор./верт.)	9,22/3,72
Частота ускоряющего напряжения, МГц	476
Номер гармоники (максимальное число сгустков в пучке)	196
Частота ускоряющего напряжения, МГц	476
Потери на излучение за оборот в поворотных магнитах, кэВ	55,7
Энергетический разброс	$5,62 \cdot 10^{-4}$
Декремент затухания колебаний, гор./верт./прод.	0,97/1/2,03
Число поворотных магнитов	32
Число квадрупольных линз	64
Число секступольных линз	32
Максимальное поле в дипольных магнитах, Тл	1,21
Максимальный градиент в квадрупольных линзах, Тл/м	25,02
Максимальный градиент в секступольных линзах, Тл/м ²	42,96

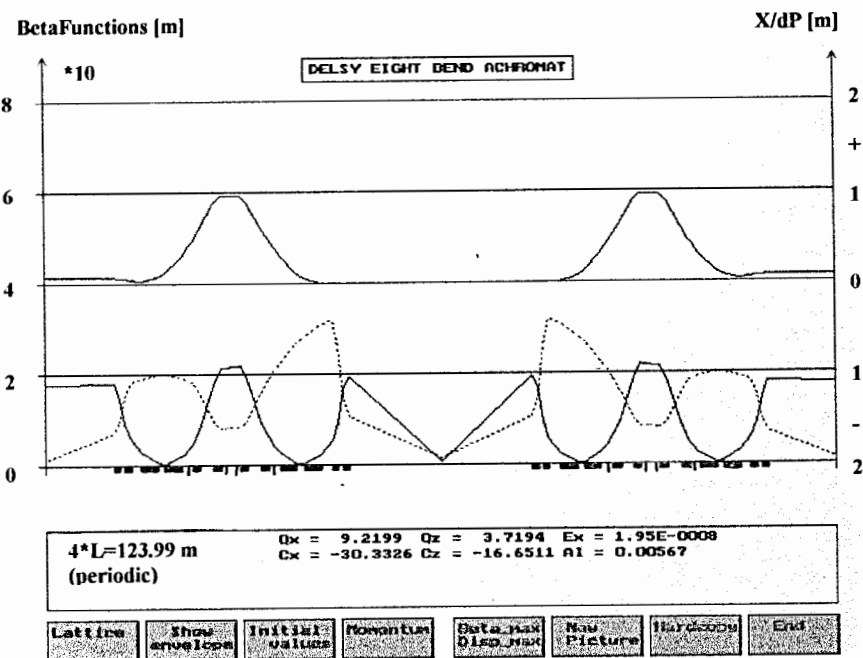


Рис.2. Структурные функции квадранта кольца (структура с восьмью прямолинейными промежутками)

В варианте структуры с четырьмя прямолинейными промежутками на один квадрант приходится восемь поворотных магнитов, поэтому можно использовать МВА-структуру. При этом каждый квадрант будет включать в себя элемент периодичности, согласующий элемент, прямолинейный промежуток для встроенных устройств, согласующий элемент и элемент периодичности (рис.3). Квадрант является ахроматом (рис.4). Основные параметры накопительного кольца с четырьмя прямолинейными промежутками без влияния встроенных устройств приведены в таблице 2.

МВА-структура накопительного кольца с четырьмя прямолинейными промежутками для встроенных устройств имеет лучшие параметры, чем ДВА-структура с восьмью прямолинейными промежутками. В результате для накопительного кольца выбрана структура МВА.

Таблица 2. Основные параметры накопительного кольца ДЭЛСИ с четырьмя прямолинейными промежутками

Периметр, м	136,04
Радиус кривизны траектории в поворотных магнитах, м	3,3
Максимальная энергия электронного пучка, ГэВ	1,2
Энергия электронного пучка при инжекции, ГэВ	0,8
Коэффициент расширения орбиты	$5,03 \cdot 10^{-3}$
Хроматичность (гор./верт.)	-22,2/-12,6
Ток накопленных электронов, мА	300
Горизонтальный эмиттанс, нм·рад	11,4
Частоты бетатронных колебаний (гор./верт.)	9,44/3,42
Частота ускоряющего напряжения, МГц	476
Номер гармоники (максимальное число сгустков в пучке)	216
Равновесная длина электронного сгустка, мм	8,67
Потери на излучение за оборот в поворотных магнитах, кэВ	55,7
Энергетический разброс	$5,56 \cdot 10^{-4}$
Декремент затухания колебаний, гор./верт./прод.	0,964/1/2,036
Число поворотных магнитов	32
Число квадрупольных линз	56
Число секступольных линз	48
Максимальное поле в дипольных магнитах, Тл	1,21
Максимальный градиент в квадрупольных линзах, Тл/м	19,1
Максимальный градиент в секступольных линзах, Тл/м ²	88,6

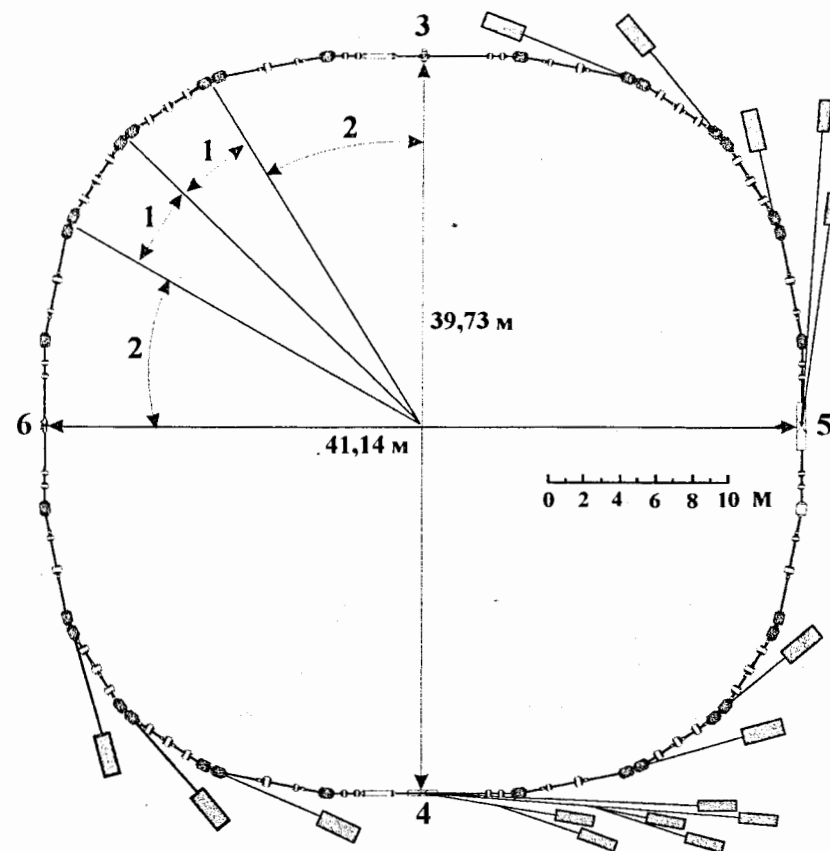


Рис.3. Схема накопительного кольца ДЭЛСИ:

1 – элемент периодичности, 2 – согласующий элемент,
3 – ВЧ-станция, 4 – вигглер, 5 – ондулятор, 6 – септумный магнит

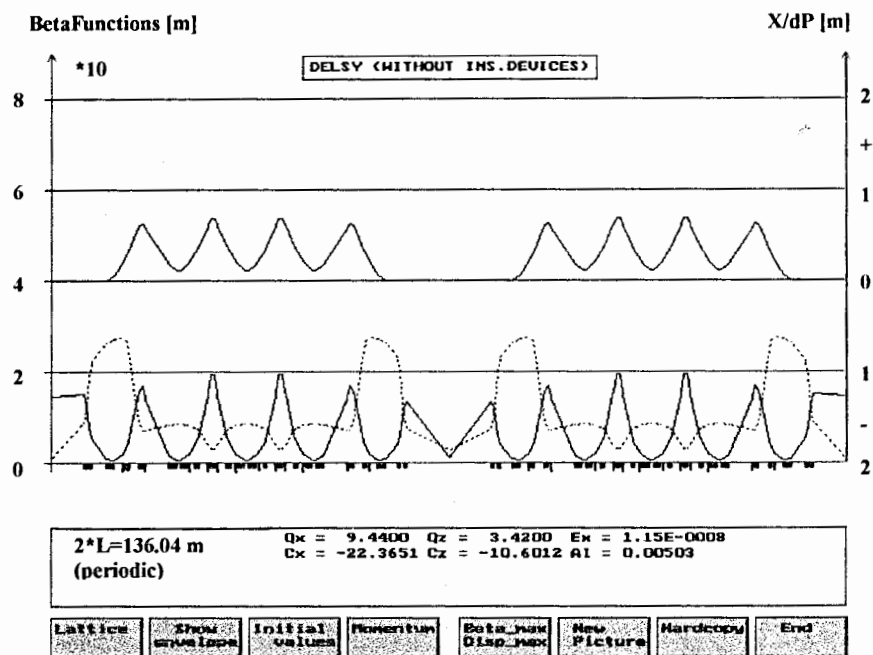


Рис.4. Структурные функции половины накопительного кольца ДЭЛСИ (структура с четырьмя прямолинейными промежутками)

Результаты численного моделирования влияния нелинейных полей секступольных линз на динамику частицы показали значительное влияние секступольных резонансов на размеры динамической апертуры. Поэтому для выбора рабочей точки на диаграмме частот необходимо исследовать фазовое пространство. В результате исследования были выбраны две рабочие точки: $Q_x/Q_z = 9,44/3,42$ и $Q_x/Q_z = 9,58/3,56$. Основные параметры накопительного кольца для этих рабочих точек отличаются слабо, однако при частотах бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 9,58/3,56$ размеры динамической апертуры больше. Анализ фазовых траекторий горизонтального движения показал, что при режиме работы с частотами $Q_x/Q_z = 9,58/3,56$ на фазовой плоскости появляются большие острова устойчивости. Наличие больших островов приводит к быстрому переходу частиц из внутренних областей фазового пространства во внешние. В результате распределение частиц не является гауссовским. Появляются большие

перенаселенные «хвосты» распределения, соответствующие внутренней области островов. В результате время жизни пучка существенно уменьшится, хотя динамическая апертура будет достаточно велика. Кроме того, как показали расчеты, при включении вигглера при частотах бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 9,58/3,56$, эмиттанс пучка увеличивается до 45 нм·рад, а при рабочей точке $Q_x/Q_z = 9,44/3,42$ - только до 39 нм·рад. При частотах бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 9,58/3,56$ и включенном вигглере без добавления секступольной компоненты в его магнитное поле динамическая апертура уменьшается почти в два раза по сравнению с апертурой при режиме работы без встроенных устройств. В то же время, при частотах бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 9,44/3,42$ и при включенном вигглере с добавлением секступольной компоненты динамическая апертура уменьшается только на 17%.

В результате предпочтение было отдано рабочей точке $Q_x/Q_z = 9,44/3,42$.

В главе 3 приводятся результаты численного анализа влияния встроенных устройств на линейную оптику накопителя ДЭЛСИ. Определены требования на структурные функции в местах установки встроенных устройств. Разработана и рассчитана схема компенсации их влияния на основные параметры накопителя.

Накопительное кольцо ДЭЛСИ относится к низкоэнергетичным ускорителям, поэтому самый недорогой и реальный путь получения излучения в районе жесткого рентгена - установка на накопителе сверхпроводящего вигглера с магнитным полем 10 Тл. При выборе значений структурных функций для середины вигглерного прямолинейного промежутка учитывалось влияние вигглера на эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка, требование получения из него максимальной яркости и требование минимизации сдвига частот бетатронных колебаний. После расчета структурные функции были выбраны следующими: $\beta_x = 1,05$ м, $\beta_y = 2,8$ м, $D_x = D_x' = 0$.

Далее приводится модель вигглера и расчет его влияния на линейную оптику кольца. Компоненты дополнительного магнитного поля, появившегося на

орбите в результате размещения вигглера, приводят к дополнительной фокусировке, что вызывает сдвиг частот бетатронных колебаний и искажение структурных функций накопителя. При включении вигглера с магнитным полем 10 Тл орбита становится неустойчивой. «Восстановление» оптики проводилось в два этапа. Сначала путем вариации сил в двух дублетах квадрупольных линз, расположенных рядом с вигглером, обеспечивалось выполнение условия $\alpha_x = \alpha_z = 0$ в центре вигглера, что позволило получить устойчивую орбиту. При этом в остальной части кольца бета-функции оставались такими же, как и в случае выключенного вигглера, но частоты бетатронных колебаний Q_x, Q_z изменились вследствие изменения бета-функций в промежутке с вигглером. Затем производилась коррекция частот бетатронных колебаний с одновременной минимизацией биений бета-функций по всему ускорителю. При этом варьировались силы всех семейств квадрупольных линз.

При частотах бетатронных колебаний $Q_x/Q_y = 9,44/3,42$ для модели вигглера без фокусировки, связанной со смещением орбиты и наличием секступольной составляющей магнитного поля, изменение бета-функций для структуры с включенным вигглером составило 7%. Вигглер сильно влияет на линейную оптику: эмиттанс пучка увеличился почти в 1,9 раза, энергетический разброс вырос в 1,72 раза. При сильном магнитном поле вигглера и относительно малой энергии электронного пучка все вышеперечисленные эффекты могли быть гораздо сильнее, но их удалось минимизировать, благодаря удачной оптимизацией структурных функций накопителя.

При учете краевой фокусировки центрального полюса вигглера, возникающей от секступольной компоненты магнитного поля вигглера, коррекция его влияния заметно усложняется. Возрастают градиенты квадрупольных линз, расположенных рядом с вигглером. Для линз, расположенных в согласующей ячейке между дипольными магнитами, требуются дополнительные источники питания, так как их градиенты теперь не совпадают с градиентами подобных линз, размещенных в противоположном прямолинейном промежутке. Определяются требования на вигглер для накопительного кольца

ДЭЛСИ: необходима минимизация фокусировки, обусловленной наличием секступольной компоненты и смещением орбиты в вигглере. Это будет сделано при конструировании специализированного вигглера для накопительного кольца ДЭЛСИ.

Установка ондулятора на накопитель, также как и установка вигглера, приводит к возмущению движения, изменению его основных характеристик, только более слабому. Поэтому для центра прямолинейного промежутка, предназначенного для установки ондулятора, учитывая требования получения максимальной яркости излучения и хорошего значения времени жизни пучка, определяемого рассеянием на атомах остаточного газа, структурные функции задавались так: $D_x = D_x' = 0, 12 м \leq \beta_x \leq 15 м, \beta_z \leq 1 м$. В результате расчета для середины ондуляторного промежутка были получены следующие данные: $\beta_x = 14,55 м, \beta_z = 0,98 м$.

Далее приводится модель магнитного поля ондулятора. Для компенсации действия ондулятора на линейную оптику была произведена «глобальная» коррекция. «Восстановление» оптики проводилось также как и для вигглера, при этом варьировались силы всех семейств квадрупольных линз. Показано, что ондулятор слабо влияет на эмиттанс и энергетический разброс в пучке.

В главе 4 исследована динамическая апертура накопительного кольца ДЭЛСИ при различных режимах его работы. Приведены требования к динамической апертуре, проведен ее расчет при выключенных встроенных устройствах, при включенном вигглере и ондуляторе без учета систематических и случайных ошибок в магнитных элементах структуры накопителя, а также при их введении в структуру.

Необходимая динамическая апертура накопительного кольца ДЭЛСИ определяется требованиями эффективной инжекции и достижением большого времени жизни пучка. С учетом толщины ножа септумного магнита (3 мм), запаса на ошибки замкнутой орбиты (5 мм), минимальная горизонтальная динамическая апертура в месте установки септумного магнита составляет 13,42 мм.

Вертикальная динамическая апертура при инжекции определяется вертикальным размером инжектируемого пучка, и с запасом на ошибки замкнутой орбиты составляет 3,2 мм. Для времени жизни определяющим является эффект внутривидового рассеяния электронов друг на друге (эффект Тушека). Для обеспечения времени жизни около 4 часов в многосгустковом режиме на энергии 1,2 ГэВ при связи бетатронных колебаний 1%, со средним вакуумом 1,5 нТорр и с учетом возможного искажения орбиты 3 мм в горизонтальной плоскости и 1 мм в вертикальной, требуемая апертура составляет 16 мм в горизонтальной плоскости и 4,6 мм в вертикальной.

При выключенных встроенных устройствах, без учета систематических и случайных ошибок, динамическая апертура для частиц с равновесным импульсом в месте установки септума определяется неравенствами:

$$-29 \text{ мм} < A_x < 30 \text{ мм}, -6,5 \text{ мм} < A_z < 6,5 \text{ мм}.$$

Если σ_x , σ_z – стандартный горизонтальный и вертикальный размеры пучка, то половина динамической апертуры составляет $N_x \cdot \sigma_x = 77 \sigma_x$ по горизонтали и $N_z \cdot \sigma_z = 90 \sigma_z$ по вертикали. Фазовые траектории носят регулярный характер и не обнаруживают сложной топологии.

Для того, чтобы проверить чувствительность динамической апертуры к погрешностям магнитного поля и установки магнитных элементов, было проведено моделирование для структуры со случайными ошибками и для структуры с систематическими ошибками. Ошибки в элементах структуры задавались случайным образом, значения среднеквадратичных отклонений составляли: смещение квадрупольных линз (в пределах $\pm \sigma$) 200 мкм, поворот дипольных магнитов вокруг продольной оси 1 мрад, допуск на магнитное поле в дипольных магнитах – $5 \cdot 10^{-4}$. Для расчета динамической апертуры с учетом ошибок из 50 вариантов было выбрано два. В первом из них возникает максимальное по всем 50 вариантам отклонение орбиты, во втором – типовое (среднее по вариантам) отклонение орбиты. Динамическая апертура для этих двух наборов составила $59 \sigma_x$, $91 \sigma_z$ и $67 \sigma_x$, $83 \sigma_z$, соответственно для первой схемы коррекции (40 корректоров для горизонтальной плоскости и 32 – для

вертикальной) и $58 \sigma_x$, $100 \sigma_z$ и $64 \sigma_x$, $96 \sigma_z$ – для второй схемы коррекции (24 корректора для горизонтальной и 32 корректора для вертикальной плоскостей).

Для расчета динамической апертуры при наличии систематических ошибок в элементах структуры накопительного кольца были использованы данные расчета магнитного поля модифицированных дипольных магнитов и данные магнитных измерений квадрупольных линз, сделанные на AmPS. Данные расчета были аппроксимированы полиномом пятой степени (до додекаполя). Динамическая апертура при наличии систематических ошибок составила $69 \sigma_x$, $80 \sigma_z$, для частиц с равновесным импульсом (рис.5).

Во всех рассмотренных случаях динамическая апертура достаточна для эффективной инжекции пучка в накопительное кольцо.

Для накопительного кольца ДЭЛСИ симметрия структуры равна двум, поэтому уменьшение динамической апертуры при включении вигглера (без учета его секступольной компоненты) не очень сильное. Размеры динамической апертуры для структуры с вигглером при энергии электронного пучка 1,2 ГэВ при частотах бетатронных колебаний $Q_x/Q_z = 9,44/3,42$ без отклонения равновесного импульса определяются неравенствами:

$$-28 \text{ мм} < A_x < 34 \text{ мм} \text{ (половина динамической апертуры составляет } 63 \sigma_x),$$

$$-8 \text{ мм} < A_z < 8 \text{ мм} \text{ (половина динамической апертуры составляет } 86 \sigma_z).$$

При учете секступольной компоненты вигглера, создающей дополнительную фокусировку за счет смещения орбиты в его нелинейном магнитном поле, динамическая апертура уменьшается до

$$-22 \text{ мм} < A_x < 25 \text{ мм}, -4,5 \text{ мм} < A_z < 4,5 \text{ мм}.$$

При умеренной амплитуде колебаний на динамическую апертуру влияют резонансы третьего и четвертого порядков. При увеличении амплитуды движения существенную роль начинают играть резонансы высоких порядков, из-за них на границе динамической апертуры появляются островки стабильного движения.

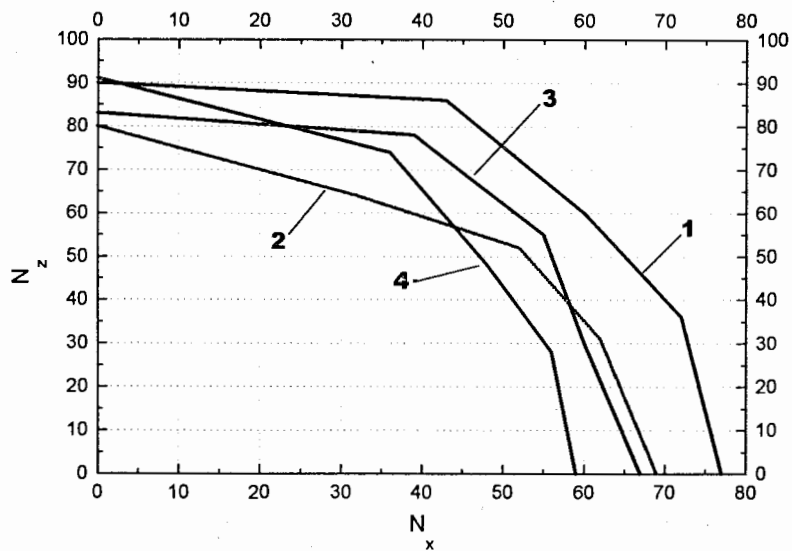


Рис.5. Динамическая апертура для магнитной структуры при $Q_x/Q_z=9,44/3,42$.

- 1 – без учета ошибок, 2 – с учетом систематических ошибок магнитного поля,
 3 – с учетом случайных ошибок при среднем отклонении орбиты,
 4 – с учетом случайных ошибок при максимальном отклонении орбиты.

При введении случайных ошибок в структуру кольца с включенным вигглером динамическая апертура уменьшилась не сильно: для структуры с набором ошибок, дающим максимальное по 50 вариантам отклонение орбиты, динамическая апертура составила $53\sigma_x$, $87\sigma_z$ (рис.6).

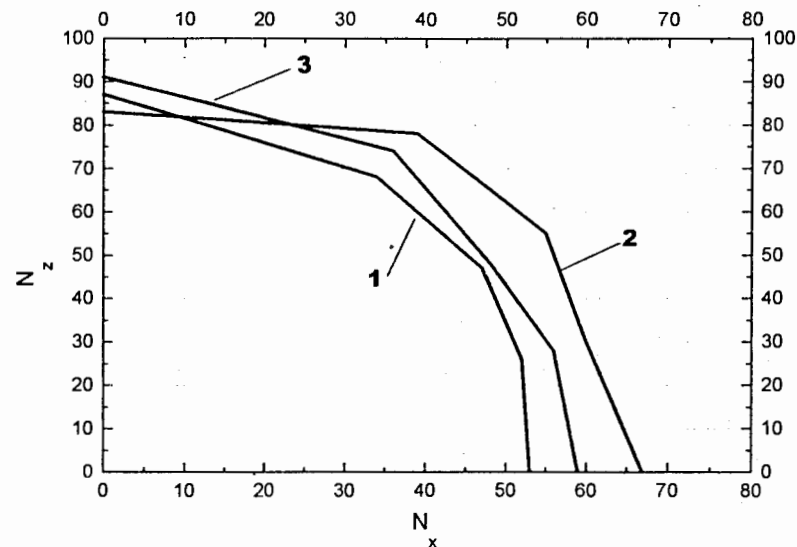


Рис.6. Динамическая апертура с учетом ошибок (40 корректоров для горизонтальной плоскости, 32 – для вертикальной):

- 1 – структура с максимальным отклонением орбиты и включенным вигглером,
 2 – структура со средним отклонением орбиты без вигглера,
 3 – структура с максимальным отклонением орбиты без вигглера

Во всех рассмотренных случаях динамическая апертура достаточна для удовлетворительного значения времени жизни пучка.

Размеры динамической апертуры в точке инжекции при включенном ондуляторе определяются неравенствами:

$$-22 \text{ мм} < A_x < 25 \text{ мм (что составляет } 68\sigma_x),$$

$$-4,7 \text{ мм} < A_z < 4,7 \text{ мм (что составляет } 88\sigma_z).$$

Как показали расчеты времени жизни пучка, динамическая апертура при включенном ондуляторе достаточна для удовлетворительного значения времени жизни.

В главе 5 описываются технические аспекты накопителя. Выбрана схема коррекции замкнутой орбиты накопительного кольца ДЭЛСИ. Приводятся результаты расчета замкнутой орбиты при введении случайных ошибок в магнитных элементах при выключенной и включенной системе коррекции, сделан выбор параметров корректоров. Описывается схема инжекции электронного пучка из линейного ускорителя в накопительное кольцо. Приведены результаты расчета канала транспортировки. Рассмотрены различные физические процессы, ограничивающие время жизни пучка.

Для ДЭЛСИ рассматривались две схемы коррекции замкнутой орбиты: в первой схеме использовались 40 корректоров для горизонтальной плоскости (три для согласующих ячеек и два для периодических) и 32 корректора для вертикальной плоскости (по два корректора в согласующих и периодических ячейках). В случае, если по техническим причинам не удастся разместить корректоры внутри дипольных магнитов, была предложена вторая схема коррекции без этих корректоров: 24 корректора для горизонтальной плоскости (два для согласующих ячеек и один для периодических) и 32 корректора для вертикальной плоскости (по два корректора в согласующих и периодических ячейках). Обе схемы коррекции имели 48 датчиков положения пучка (по три датчика в согласующих и периодических ячейках).

Орбита рассчитывалась с выключенной и включенной системой коррекции при энергии электронного пучка 1,2 ГэВ по пятидесяти вариантам набора ошибок для горизонтальной и вертикальной плоскостей. Максимальное отклонение орбиты при выключенной системе коррекции составило в одном из вариантов 15 мм для горизонтальной плоскости и 26 мм – для вертикальной. В одном из 50 вариантов синхротрон оказался неустойчивым из-за суммового резонанса связи. Максимальное среднеквадратичное отклонение орбиты – 5,5 мм для горизонтальной плоскости и 10 мм для вертикальной. При включенной системе коррекции максимальное и среднеквадратичное отклонения орбиты составили для горизонтальной плоскости 1,8 мм и 0,6 мм в первой схеме коррекции, 3 мм и 0,96 мм во второй, для вертикальной плоскости – 0,99 мм и 0,36 мм соответственно. Максимальная сила корректоров для горизонтальной плоскости

составляет 0,84 мрад в первой схеме коррекции и 0,74 мрад во второй, что обеспечивают имеющиеся корректоры с AmPS. Для вертикальной плоскости максимальная сила корректоров составляет 0,95 мрад, что также обеспечивают имеющиеся корректоры с AmPS. Эмиттанс пучка при коррекции ошибок меняется незначительно. Эффективность коррекции достаточно велика: разброс частот бетатронных колебаний для 50 вариантов набора ошибок до коррекции снижается после ее введения до $\Delta Q_{x,z} \approx 0,01$, отклонение орбиты – до $\Delta x \leq 1,8$ мм, $\Delta z \leq 1$ мм для типовой машины при первом варианте коррекции.

Используемый в качестве инжектора линейный ускоритель «Линак-800» будет установлен в здании №118 ОИЯИ. Для размещения кольца частично будет использован находящийся рядом корпус №119. Разработанная структура канала транспортировки пучка из линейного ускорителя в накопительное кольцо позволяет осуществлять проводку пучка с эмиттансами $\epsilon_x = \epsilon_z = 18,9$ нм·рад.

Для накопительного кольца ДЭЛСИ была выбрана горизонтальная схема инжекции с двумя кикерами, один из которых смещает накопленный пучок, а другой – накопленный и инжектируемый пучки. Септумный магнит размещен в прямолинейном промежутке, идентичном ондуляторному. Существующий септумный магнит кольца AmPS не обеспечивает необходимый для инжекции угол ввода пучка, поэтому для ДЭЛСИ будет изготовлен новый септум с углом отклонения пучка 120 мрад. Набег горизонтальной бетатронной фазы между кикерами равен π , набег фазы между кикерами и септумным магнитом равен $\pi/2$. В результате угол, вносимый «ударом» кикера, переходит в смещение орбиты у септума, а «удар» второго кикера имеет тот же знак, что и «удар» первого. Первый кикер отклоняет накопленный пучок на угол 5,1 мрад, так что около септума равновесная орбита смещается на 15,66 мм по направлению к ножу септума. В результате инжектируемый сгусток входит в камеру из септума параллельно смещенной равновесной орбите. Второй кикер отклоняет накопленный и инжектируемый пучок на угол, компенсирующий отклонение орбиты первым кикером. Периодичность импульсов инжекции выбирается так, чтобы обеспечить трехкратное время радиационного затухания бетатронных

колебаний $3 \cdot \tau_x$, где $\tau_x = 68,5$ мсек. Таким образом, при частоте повторения импульса из линейного ускорителя 5 Гц, длительности импульса инжекции 0,4 мсек и среднем токе пучка 40 мА процесс накопления до 300 мА занимает 3 сек при эффективности захвата 50%.

Для расчета времени жизни пучка в накопительном кольце ДЭЛСИ была использована программа *BeamOpticks*, разработанная в Стэнфордском университете. Расчеты показали, что для поддержания хорошего времени жизни необходим достаточно высокий вакуум с давлением менее 1 нТорр. Время жизни пучка, ограниченное наличием в вакуумной камере остаточного газа, в многосгустковом режиме при давлении 0,7 нТорр составляет 20 часов.

При энергии электронов 1,2 ГэВ, при многосгустковом режиме работы и при давлении остаточного газа 0,723 нТорр, время жизни, ограниченное Тушек-эффектом, составляет 10 часов при связи бетатронных колебаний 1% и 19 часов при связи бетатронных колебаний 10%.

При максимальном накопленном токе пучка полное время жизни пучка составляет $\approx 4,5$ часа при связи поперечных колебаний 1%. При увеличении связи колебаний до 10% и при максимальном накопленном токе пучка полное время жизни увеличивается до ≈ 10 часов.

При включении вигглера эмиттанс накопленного пучка возрастает до 21,3 нм, соответственно увеличиваются размер сгустков и время жизни, ограниченное Тушек-эффектом. При давлении в вакуумной камере 0,7 нТорр полное время жизни пучка в этом случае достигает 10 часов при связи бетатронных колебаний 1%. При включении только ондулятора полное время жизни пучка составляет 4,2 часа.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Разработана схема комплекса, включающая линейный ускоритель и накопительное кольцо – источник синхротронного излучения, и показано, что разработанная схема обеспечивает излучение в диапазоне длин волн от инфракрасного до жесткого рентгеновского.

2. Разработана магнитная структура накопительного кольца ДЭЛСИ и показано, что она позволяет получить горизонтальный эмиттанс накопленного электронного пучка 11,4 нм·рад (с учетом влияния квантовых флуктуаций излучения) и позволяет установить сильнополевой вигглер с магнитным полем 10 Тл и ондулятор с магнитным полем 0,75 Тл. Показано, что в данной структуре возможна корректировка искажений замкнутой орбиты минимальным набором корректоров в пределах ожидаемых ошибок полей в элементах структуры. При этом время жизни пучка составляет не менее пяти часов.
3. Оптимизированы значения структурных функций на азимутах различных источников синхротронного излучения – поворотных магнитов, вигглера, ондулятора и показано, что в разработанной структуре достигается максимально возможная яркость излучения.
4. Найдены оптимальные значения бетатронных частот (рабочая точка), обеспечивающие максимальные размеры области устойчивого движения электронов в накопителе.
5. Рассчитано влияние встроенных устройств на основные параметры накопителя. Предложены способы компенсации отрицательных эффектов, возникающих при включении встроенных устройств, и показана возможность их реализации. Определены требования к вигглеру, позволяющие существенно ограничить рост эмиттанса при его включении.
6. Выбрана и оптимизирована магнитная структура канала транспортировки электронного пучка из линейного ускорителя в накопительное кольцо.

В приложениях 1, 2, 3, 4 приводятся параметры элементов магнитной структуры накопительного кольца ДЭЛСИ в представлении программы MAD и ОРА для структуры с восьмью и четырьмя прямолинейными промежутками без встроенных устройств и при включенных встроенных устройствах. Приводятся параметры магнитных элементов канала транспортировки электронного пучка из линейного ускорителя в накопительное кольцо.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (пп.1-3), трудах конференций и семинаров (пп.4-12):

1. Н.И.Балалыкин, П.Ф.Белошицкий,..., И.Н.Мешков,..., И.В.Титкова и др. «Источник синхротронного излучения третьего поколения в ОИЯИ», «Атомная энергия», т.91, выпуск 4, 2001, стр.300; Препринт ОИЯИ Р9-2001-86.
2. V.A.Arkipov, V.K.Antropov, N.I.Balalykin, P.F.Beloshitsky,...,I.N.Meshkov, ..., I.V.Titkova et al., «Project of the Dubna Electron Synchrotron», NIM A467, p.57.
3. V.A.Arkipov, V.K.Antropov, N.I.Balalykin, P.F.Beloshitsky,..., I.N.Meshkov,..., I.V.Titkova et al., «Project of the Dubna Electron Synchrotron», NIM A470, p.1.
4. В.А.Архипов, В.К.Антропов, Н.И.Балалыкин, П.Ф.Белошицкий,..., И.Н.Мешков, ..., И.В.Титкова и др., «Проект дубненского электронного синхротрона», материалы III научного семинара памяти В.П.Саранцева, ОИЯИ, Д9-2000-69, стр.7.
5. В.А.Архипов, В.К.Антропов, Н.И.Балалыкин, П.Ф.Белошицкий,..., И.Н.Мешков,..., И.В.Титкова и др., «Проект ДЭЛСИ», Материалы I Международного рабочего совещания «Синхротронный источник ОИЯИ: перспективы исследований», ОИЯИ, Д9-2000-103, стр.13.
6. Titkova I.V., Arkipov V.A., Antropov V.K. et al., «Project of the Dubna Electron Synchrotron», Proc. of EPAC'2000, p.702.
7. В.А.Архипов, В.К.Антропов, Н.И.Балалыкин, П.Ф.Белошицкий,..., И.Н.Мешков,..., И.В.Титкова и др., «Проект дубненского электронного синхротрона», Материалы XVII Всероссийского совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000, стр.13.
8. В.А.Архипов, В.К.Антропов, Н.И.Балалыкин, П.Ф.Белошицкий,..., И.Н.Мешков,..., И.В.Титкова и др., «Проект ДЭЛСИ», Материалы II Международного рабочего совещания «Синхротронный источник ОИЯИ: перспективы исследований», ОИЯИ, Д9-2002-168, стр.7.
9. П.Ф.Белошицкий, И.Н.Мешков, И.В.Титкова, «Магнитная структура источника синхротронного излучения ДЭЛСИ», Материалы IV конференции молодых ученых и специалистов, Дубна, 2000.

10. I.V.Titkova, P.F.Beloshitsky, I.N.Meshkov, E.M.Syresin, «Magnet Lattice of the Synchrotron Radiation Source DELSY», Proc. of EPAC'2000, p.708.
11. P.Beloshitsky, I.Meshkov, I.Titkova, «Optics and Dynamic Aperture Studies for Synchrotron Radiation Source DELSY», Proc. of PAC'2001, v4, p.2821.
12. П.Ф.Белошицкий, И.Н.Мешков, И.В.Титкова, «Влияние встроенных устройств на динамику пучка накопительного кольца ДЭЛСИ», Материалы V конференции молодых ученых и специалистов, Дубна, ISBN 5-8481-000-4-7, стр.102.

Получено 24 июня 2002 г.