

УДК 621.384.6

ПРОЕКТ КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2022 г. В. Н. Корчуганов^{1,*}, А. Г. Валентинов¹, С. М. Полозов², А. С. Смыгачева¹, В. А. Ушаков¹, Е. А. Фомин¹, М. В. Ковальчук¹

¹ *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия*

² *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
(Московский инженерно-физический институт), Москва, Россия*

**E-mail: vnkorchuganov@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 11.04.2022 г.

В настоящее время в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” приступили к реализации проекта модернизации источника синхротронного излучения. На базе существующей инфраструктуры взамен действующего источника – накопителя электронов с энергией 2.5 ГэВ и натуральным эмиттансом электронного пучка 98 нм рад – будет построен новый источник синхротронного излучения с энергией электронов 2.5 ГэВ и натуральным эмиттансом менее 3 нм рад. Для обеспечения “непрерывной” работы источника будет создан новый инжекционный комплекс, включающий в себя бустерный синхротрон, рассчитанный на энергию электронов 0.2–2.5 ГэВ (инжектор для основного кольца) и линейный ускоритель электронов (200 МэВ) – инжектор электронов для бустерного синхротрона с каналами транспортировки электронов ЭОК-1 (от линейного ускорителя до бустерного синхротрона) и ЭОК-2 (от бустерного синхротрона до большого накопителя). Дана концепция нового комплекса источника синхротронного излучения.

DOI: 10.31857/S0023476122050058

ВВЕДЕНИЕ

Курчатовский специализированный источник синхротронного излучения (СИ) на базе накопителя электронов с энергией 2.5 ГэВ является источником поколения 2+ с горизонтальным эмиттансом 98 нм·рад. Периметр основного накопителя составляет 124.13 м. В настоящее время в составе комплекса работают 13 экспериментальных станций и еще четыре находятся в стадии строительства. Основным источником СИ являются поворотные магниты с полем 1.7 Тл с характеристической энергией фотонов 7.07 кэВ. Полный спектральный диапазон СИ простирается от 0.1 до 2000 Å. Для расширения экспериментальных возможностей комплекса в прямолинейные промежутки основного накопителя установлены три сверхпроводящих вигглера (один с максимальным полем 7.5 Тл и два с полем 3 Тл).

Компоновка действующего комплекса позволяет выводить пучок СИ равномерно по всему периметру основного накопителя. Имеются пучковые линии двух типов: для жесткого рентгеновского излучения из поворотных магнитов и вигглеров и для ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения из слабополевых встав-

ных устройств. Работа для обеспечения эксперимента проводится при энергии электронов 2.5 ГэВ и токе 100–200 мА. Время жизни электронов в накопителе составляет 20–40 ч.

Действующая магнитная структура (или структура магнитной системы) основного накопителя – это модифицированная структура типа двойного ахроматического поворота (DBA – Double Bend Achromat) [1, 2]. Она состоит из шести суперпериодов, каждый из которых содержит по два промежутка длиной 3 м для постановки сильнополевых сверхпроводящих вигглеров и ускоряющих высокочастотных резонаторов (промежутков с нулевой дисперсией), слабополевых вигглеров, элементов системы инжекции (промежутков с ненулевой дисперсией) [3–5].

Улучшение потребительских качеств пучков – яркости и интенсивности СИ – требует модернизации всего ускорительного комплекса и перевода основного накопителя в разряд источников третьего поколения с эмиттансом электронного пучка менее 5 нм·рад. Для этого необходимо помимо создания нового основного накопителя создать новый бустерный синхротрон (энергия 0.2–2.5 ГэВ, горизонтальный эмиттанс 44 нм рад, ток

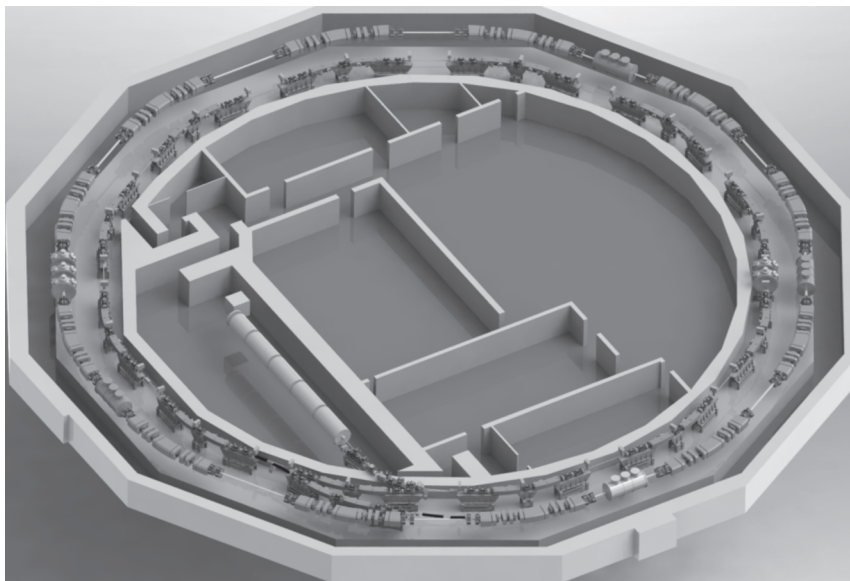


Рис. 1. Размещение ускорителей и транспортных каналов нового комплекса источника СИ в НИЦ “Курчатовский институт” на площадях имеющейся инфраструктуры.

10 мА, частота цикла 1 Гц [6] и новый линейный ускоритель электронов (энергия 0.2 ГэВ, рабочая частота 2797 МГц, энергетический разброс электронов в пучке не более 1%) [13]. Кроме того, обязательным требованием к новому проекту является сохранение всех действующих в настоящее время осей каналов экспериментальных станций с высокой точностью установки координат и углов.

ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИ

Современное развитие технологий в области создания магнитных, вакуумных, ВЧ-систем, компьютерного моделирования электромагнитных полей и динамики электронного пучка создали возможности для строительства источников СИ с использованием магнитных структур типа многократного ахроматического поворота (МВА – Multi Bend Achromat). При одних и тех же геометрических размерах накопителей благодаря более плотному расположению соседних элементов на кольце источника СИ, применению сложных и высокоточных магнитных элементов, малоапертурных вакуумных камер и вставных устройств, миниатюризации элементов диагностики, высокостабильным источникам питания появилась возможность достигать горизонтальных эмиттансов, почти на 2 порядка меньших, чем в структурах типа двойного ахроматического поворота. Первыми успешно реализованными проектами с магнитными структурами типа МВА являются проект MAX-IV [7] и проект модернизации ESRF – ESRF EBS [8]. Также заслуживают внимания проекты, находящиеся в различной стадии готов-

ности – это проект SLS-2 [9] и самый амбициозный на сегодня – проект PETRA-IV [10], который использует идеи ESRF и наиболее близок к достижению дифракционно-ограниченного источника на длине волны 1 Å.

С учетом мирового опыта модернизации действующих источников СИ были сформулированы основные требования, предъявляемые к новой магнитной структуре Курчатовского источника СИ (КИСИ): сохранение всех экспериментальных станций; достижение эмиттанса электронного пучка менее 5 нм·рад; сохранение спектрального диапазона излучения; сохранение количества, длин и координат осей прямолинейных промежутков с нулевой дисперсионной функцией; обеспечение возможности инжекции электронного пучка из бустерного синхротрона; достижение времени жизни электронного пучка не менее 10 ч; сохранение периметра основного накопителя; удовлетворение технологическим ограничениям со стороны всех систем. Бустерный синхротрон будет размещен в одном и том же тоннеле концентрически внутри кольца источника СИ, а новый линейный ускоритель (0.2 ГэВ) размещен в так называемом малом зале на месте действующего линейного ускорителя (0.08 ГэВ) (рис. 1).

НОВАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ИСТОЧНИКА СИ

КИСИ является одним из самых компактных в мире. Накопительное кольцо образовано шестью зеркально-симметричными суперпериодами. Для уменьшения эмиттанса в новой оптической структуре при сохранении геометрических разме-

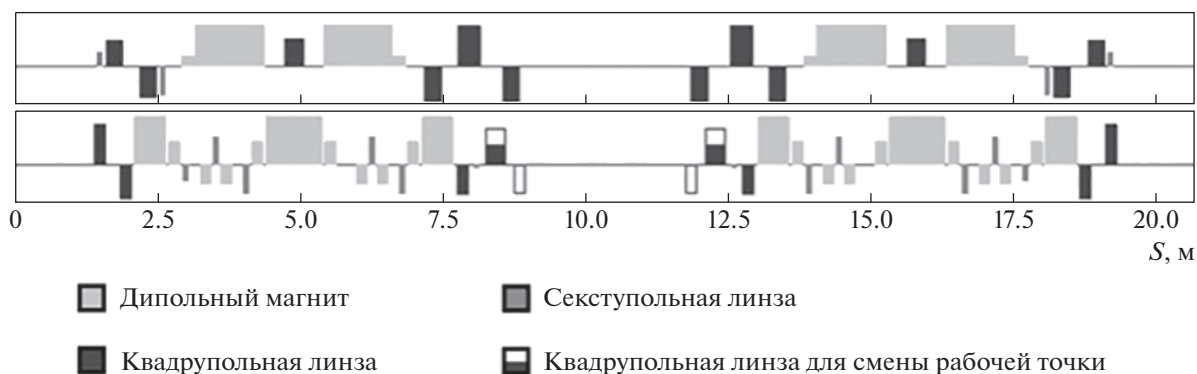


Рис. 2. Действующая (вверху) и новая (внизу) магнитная структура КИСИ.

ров накопителя эффективно использовать сэндвич-магниты и магниты с антиповоротом [11, 12]. Согласно проведенным исследованиям оптимальным вариантом является магнитная структура суперпериода, состоящая из двух модифицированных ячеек типа 3ВА, каждая ячейка 3ВА содержит три поворотных магнита (поле 2 Тл), четыре дипольно-квадрупольных магнита (магниты с совмещенными функциями, знак поля совпадает со знаком поля в диполях, тип 1), четыре дипольно-квадрупольных магнита с антиповоротом (магниты с совмещенными функциями, знак поля противоположен знаку поля в диполях, тип 2), один дублет и один триплет квадрупольных линз. Типы используемых магнитных элементов в новой и действующей структурах на длине одного суперпериода и их расположение показаны для сравнения на рис. 2.

Для того чтобы максимально минимизировать эмиттанс, в новой структуре пришлось отойти от жесткого выполнения некоторых требований к ней, а именно от точного сохранения периметра накопителя и сохранения положений прямолинейных промежутков. Выполнение этих требований не позволяет получить эмиттанс электронного пучка менее 10 нм рад. Для увеличения расстояния между элементами была увеличена индукция поля в поворотных магнитах от 1.7 до 2.0 Тл.

Отказ от жесткого выполнения этих требований вполне возможен. В настоящее время экспериментальные станции, работающие с пучками СИ из сверхпроводящих вигглеров, находятся на стадии строительства или модернизации. На данном этапе можно обеспечить их параллельный перенос на необходимое расстояние, а имеющаяся высокочастотная система позволяет обеспечить работу основного накопителя при изменении периметра вплоть до ± 100 мм. Увеличение индукции поля в поворотных магнитах естественным образом приведет к изменению спектральных характеристик излучения (оно станет более жестким), однако получаемые технологические

упрощения конструкций магнитных элементов и расширение возможностей оптимизации и настройки магнитной структуры перевешивают. Характеристики действующей и новой структуры для сравнения приведены в табл. 1.

Использование в новой структуре магнитов с относительно большим антиповоротом позволяет, с одной стороны, существенно уменьшить эмиттанс электронного пучка, но, с другой стороны, приводит к существенному увеличению потерь электронами энергии на излучение и увеличению энергетического разброса. В отсутствие встраиваемых устройств имеющаяся ВЧ-система способна компенсировать потери энергии электронов в новой структуре в штатном режиме. Однако при включении всех вставных устройств (до девяти) работа ВЧ-системы с номинальным током 200 мА будет близка к пределу своих возможностей, и в этом случае может потребоваться переход на работу с меньшими токами электронного пучка. Оптические функции для новой структуры показаны на рис. 3.

В новой магнитной структуре в прямолинейных промежутках дисперсионная функция равна нулю. Поэтому промежутки могут быть использованы для постановки как слабополевых, так и сильнополевых вигглеров. Еще одна особенность структуры – близкие значения горизонтальной и вертикальной β -функций в прямолинейных промежутках. Это позволит при 100%-ной связи горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний обеспечить круглые пучки СИ, исходящих из встраиваемых устройств, и тем самым расширить экспериментальные возможности комплекса.

Достижение малых эмиттансов требует создания магнитооптических структур с более сильной фокусировкой, что приводит к увеличению натурального хроматизма и, как следствие, к увеличению сил секступольных линз, применяемых для его компенсации, к более сильному влиянию нелинейных компонент магнитного поля на движение электронов, и, как следствие, к появлению

Таблица 1. Основные параметры КИСИ до и после модернизации

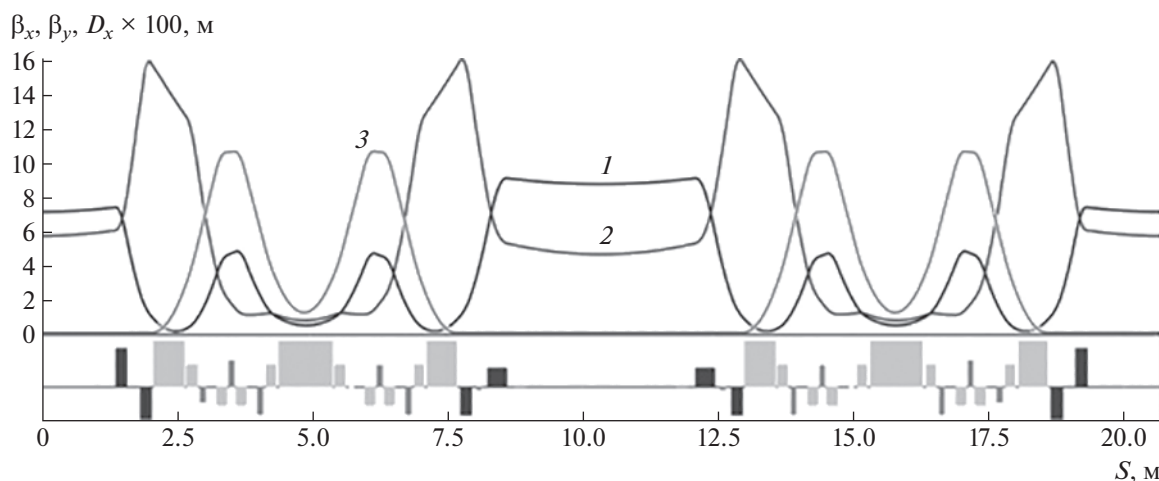
Параметр	Действующий	Модернизированный
Энергия, ГэВ	0.45–2.5	2.5
Периметр, м	124.130	124.174
Количество суперпериодов		6
Эмиттанс, нм рад	97.7	2.86
Энергетический разброс	0.95×10^{-3}	1.77×10^{-3}
Бетатронные частоты, ν_x/ν_y	7.788/6.696	14.853/6.755
Динамическая апертура, мм	$\pm(20-30)$	$\pm(10-15)$
Энергетический акцептанс, %	± 2.5	$-2.5/+3.5$
Натуральный хроматизм, ξ_x/ξ_y	$-16.7/-12.8$	$-29.3/-27.1$
Потери энергии на оборот, кэВ	680.7	925.4
Критическая энергия фотонов из поворотных магнитов, кэВ	7.06	8.31
Времена затухания $\tau_x/\tau_y/\tau_s$, мс	3.172/3.041/1.490	0.955/2.238/3.404
Промежутки для вигглеров	5	9
Станции из магнитов	до 24	до 36

большого количества бетатронных резонансов и уменьшению размеров динамической апертуры.

Для компенсации натурального хроматизма, увеличения размера динамической апертуры и минимизации сдвига частот бетатронных колебаний в зависимости от амплитуд бетатронных колебаний и амплитуды отклонения импульса от равновесного значения было использовано шесть семейств хроматических линз и одно семейство гармонических линз (всего 84 секступольных линз). Силы всех секступольных линз были оптимизированы с целью минимизации влияния нелинейных эффектов на динамику электронного пучка. В отсутствие ошибок в размерах элементов магнитной структуры, возникающих при изготовлении, ошибок в величинах индукции магнитных полей в магнитных элементах и ошибок при

их геодезическом позиционировании, размеры динамической апертуры, приведенные к центру промежутков с дублетами квадрупольных линз, следующие: вертикальный размер – ± 12 мм, а горизонтальный – ± 16 мм, что достаточно для осуществления инжекции электронного пучка. На рис. 4 показана расчетная динамическая апертура в центре промежутков с дублетами квадрупольных линз без учета ошибок в значениях индукции полей магнитных элементов, изготовлении, геодезическом позиционировании.

Смещение рабочей точки на диаграмме бетатронных частот в зависимости от амплитуды колебаний электронов внутри области поля ± 11 мм по горизонтали и ± 8 мм по вертикали не превышает ± 0.015 .

**Рис. 3.** Оптические функции на длине одного суперпериода.

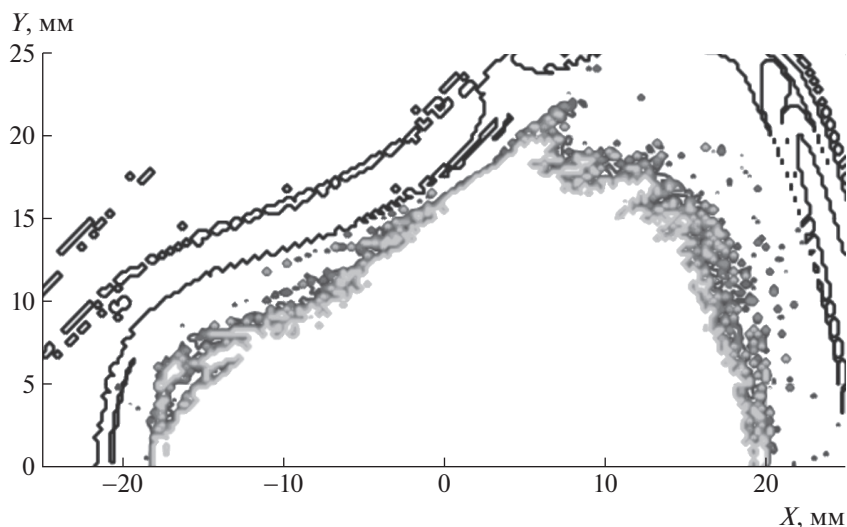


Рис. 4. Расчетная динамическая апертура без учета ошибок.

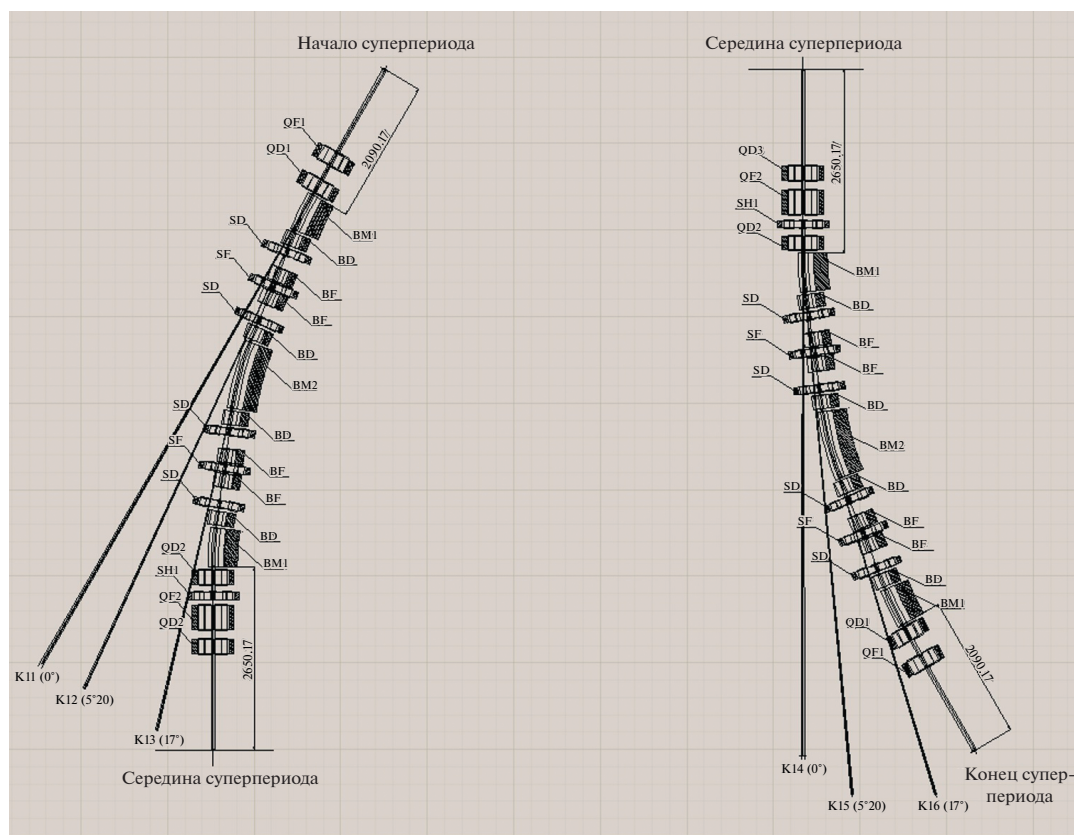


Рис. 5. Вывод излучения из поворотных магнитов (углы 5°20' и 17°) и вставных устройств (углы 0°) одного суперпериода нового источника СИ.

Результаты моделирования показывают, что при среднеквадратичной ошибке позиционирования магнитных элементов 50 мкм динамическая апертура уменьшается в среднем до ± 10 мм, а искажения замкнутой орбиты достигают 5 мм в обеих плоскостях. Но уже при включении кор-

рекции динамическая апертура восстанавливается практически до исходного размера в отсутствие ошибок, а искажения замкнутой орбиты не превышают размера электронного сгустка.

На рис. 5 приведена схема вывода каналов излучения из нового источника СИ. В соответствии

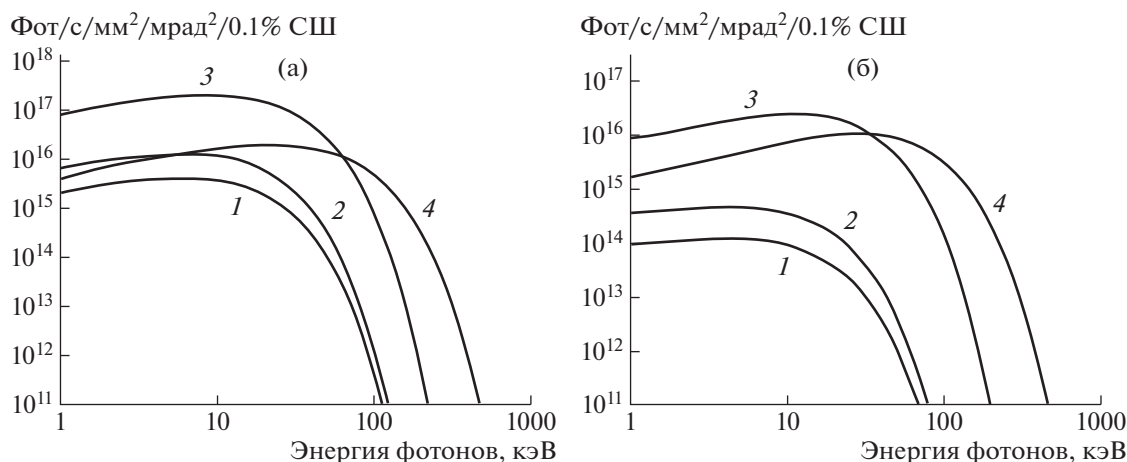


Рис. 6. Сравнение спектральной яркости СИ из различных устройств в новой (а) и действующей (б) структурах КИСИ при токе электронов 200 мА: 1, 2 – поворотные магниты; 3 – сверхпроводящий вигглер (3 Тл, 50 + 4 полюса); 4 – сверхпроводящий вигглер (7.5 Тл, 19 + 2 полюса). СШ – спектральная ширина.

с увеличением числа поворотных магнитов количество экспериментальных станций, работающих с пучками СИ и выведенных из поворотных магнитов, можно увеличить в 1.5 раза.

Новая магнитная структура обеспечивает существенное повышение качества фотонного пучка, излучаемого всеми установленными на кольце источниками. Главным образом это улучшение проявляется в увеличении яркости излучения в 30–50 раз. Для иллюстрации на рис. 6 приведены графики спектральных характеристик СИ, генерируемого существующими сверхпроводящими вигглерами в действующей и новой структурах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчетная магнитооптическая структура нового источника СИ в Курчатовском институте обеспечит в ~ 30 –50 раз меньший натуральный эмиттанс, что позволит добиться параметров пучков СИ (яркости и интенсивности) на уровне источников третьего поколения. Для успешной реализации проекта уделяют пристальное внимание разработке и оптимизации магнитных элементов источника СИ, которые должны быть выполнены и установлены на свои места с высокой точностью. В настоящее время продолжаются работы, связанные с электрическими, магнитными и механическими расчетами магнитовакуумной системы основного накопителя – источника СИ. Геометрия малоапертурной вакуумной камеры требует тщательной проработки с учетом малых апертур и излучения, генерируемого магнитами с антиповоротами. Особое значение имеет оптимальное размещение элементов вакуумной откачки и охлаждения вакуумной камеры (приемников

СИ), локальной защиты элементов, находящихся внутри вакуумной камеры (диагностика), от излучения, расположение и сопряжение фронтендов (переходных частей от вакуумной камеры накопителя к каналу вывода СИ) с вакуумной камерой. Немаловажным является вопрос долговременной стабилизации температуры воздуха в туннеле основного накопителя с учетом периодически работающего бустерного синхротрона.

Электромагнитные расчеты и оптимизация геометрии всех магнитных элементов бустерного синхротрона закончены. Разработаны технические задания ко всем магнитным элементам, достаточные для начала работ по разработке конструкторской документации с учетом закладываемой технологии для производства магнитов бустерного синхротрона. Основные узлы ВЧ-систем для основного накопителя и бустерного синхротрона определены и находятся в стадии производства.

Спроектирована структура линейного ускорителя электронов с энергией 200 МэВ. Определены оптимальные параметры резонансной ускоряющей структуры с высоким импедансом и необходимая система СВЧ-питания. Для этого были проведены работы по оптимизации электронной пушки, ячеек ускоряющих секций ускорителя, предгруппирователей, элементов СВЧ-тракта и выполнено математическое моделирование динамики электронного пучка в ускорителе. Показано, что для достижения проектной энергии 200 МэВ ускоритель должен включать в себя четыре регулярные ускоряющие секции длиной ~ 2 м каждая с градиентом ускоряющего поля ~ 420 кВ/см, что обеспечит прирост энергии ~ 50 МэВ на секцию. Секция представляет собой бипериодическую ускоряющую структуру, рабо-

тающую на стоячей волне и включающую 40 ускоряющих ячеек и 39 ячеек связи. Коэффициент токопрохождения от выхода электронной пушки до выхода четвертой регулярной секции 54% [13]. Энергетический спектр пучка после оптимизации составляет $\pm 0.9\%$ ширины на полувывоте, выходной поперечный эмиттанс ~ 0.15 мм мрад.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-12039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chasman R., Green G.K.* Design of a National Dedicated Synchrotron Radiation Facility. OSTI 7334216, 1976.
2. *Chasman R., Green G.K., Rowe E.M.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. V. NS-22. № 3. P. 1765.
3. *Корчуганов В.Н.* Дис. “Разработка и создание специализированных источников СИ”... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, ИЯФ, 2001.
4. *Anashin V.V., Valentinov A.G., Veshcherevich V.G. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1989. V. 282. P. 369.
5. *Валентинов А.Г., Воблый П.Д., Михайлов С.Ф. и др.* Магнитная система накопителя Сибирь-2 — специализированного источника СИ. Препринт ИЯФ 89-174, 1989.
6. *Смыгачева А.С., Корчуганов В.Н., Фомин Е.А.* // Прикладная физика. 2021. № 5. С. 99. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-5-99-105>
7. MAX-IV Conceptual Design Report. MAX-lab.
8. ESRF Upgrade Program Phase II (2015–2022) Technical Design Study. ESRF, 2014.
9. SLS-2 Conceptual Design Report. PSI-Bericht, 2017.
10. *Agapov I., Brinkmann R., Chae C. et al.* 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, Shanghai, China, 2018. P. 12. <https://doi.org/10.18429/JACoW-FLS2018-MOP1WB01>
11. *Fomin Ye., Korchuganov V.* Proc. 26th Russ. Particle Accelerator Conf. Protvino, 2018. P. 84. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEZMH02>
12. *Левичев Е.Б.* // Успех физ. наук. 2018. Т. 188. № 1. С. 31.
13. *Ashanin I.A., Polozov S.M., Pronikov A.I. et al.* Proc. 27th Russ. Particle Accelerator Conf. Alushta, 2021. P. 145. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA07>