

## ДИФРАКЦИОННО-ОГРАНИЧЕННЫЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ 6-ГЭВ ЭЛЕКТРОННОГО НАКОПИТЕЛЯ

*Е. А. Фомин<sup>1</sup>, В. Н. Корчуганов, А. С. Смыгачева*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Официальное открытие единственного в России специализированного источника синхротронного излучения состоялось в НИЦ «Курчатовский институт» в 1999 г. В настоящее время по своим основным параметрам он является источником синхротронного излучения 2-го поколения. Будущие возможности для самых современных исследований с помощью синхротронного и ондуляторного излучения могут быть обеспечены в России только путем создания новых рентгеновских источников. В ближайшие два-три десятилетия такие источники будут отвечать растущим экспериментальным требованиям, таким как сверхвысокая пространственная и временная стабильность положения излучателей, высокий коэффициент когерентности, «бесконечное» время жизни. Рассматривается вариант концептуального дизайна нового дифракционно-ограниченного источника синхротронного излучения 4-го поколения на базе 6-ГэВ накопителя электронов с натуральным эмиттансом менее  $10 \text{ пм} \cdot \text{рад}$ .

The inauguration of the only dedicated synchrotron radiation source in Russia was held at NRC “Kurchatov Institute” in 1999. At present according to its main parameters it is a 2+ generation synchrotron radiation facility. Future opportunities for the most advanced research using synchrotron and undulator radiation can be provided in Russia only by creating new X-ray sources. In the next two-three decades, the sources will meet growing experimental requirements, such as: ultra-high spatial and temporal stability of the emitters position, high coherence coefficient, “infinite” lifetime. In this article we present the conceptual design version of the new diffraction-limited synchrotron radiation source of 4th generation based on a 6-GeV electron storage ring with horizontal emittance less than  $10 \text{ pm} \cdot \text{rad}$ .

PACS: 29.20.db; 29.20.dk; 41.75.Ht; 41.85.Lc

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня курчатовский источник синхротронного излучения является единственным в России специализированным ускорительно-накопительным комплексом, предназначенным для генерации ярких пучков электромагнитного излучения в инфракрасной, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра [1]. Комплекс состоит из линейного ускорителя электронов с энергией 80–100 МэВ, бустерного синхротрона с энергией 450 МэВ и основного накопителя с энергией 2,5 ГэВ, его периметр равен 124,13 м. Основной накопитель является источником синхротронного излучения с энергией фотонов 10 эВ–100 кэВ и характеристической энергией фотонов из поворотных магнитов 7,2 кэВ.

---

<sup>1</sup>E-mail: yafomin@gmail.com

По техническим параметрам курчатовский источник синхротронного излучения — источник 2-го поколения.

В настоящее время мировое научное сообщество для проведения большинства исследований на пучках синхротронного излучения в основном использует источники 3-го поколения. Источники 2-го поколения считаются морально устаревшими, так как их параметры достаточно часто не удовлетворяют требованиям экспериментаторов. Поэтому своевременное проведение модернизации действующих источников синхротронного излучения 2-го и 3-го поколений позволит отследить потребности эксперимента, а создание новых источников следующих поколений позволит заглянуть в будущее, не достижимое для существующих источников.

Развитие исследований, проводимых в России на современном уровне с помощью синхротронного излучения, непременно должно быть связано как с модернизацией курчатовского источника синхротронного излучения до источника 3-го поколения с сохранением всех экспериментальных станций, так и с созданием нового источника — 4-го поколения.

### **РАЗВИТИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Магнитооптическая структура типа *double bend achromat* (DBA) была разработана в 1970-х гг. и легла в основу источников синхротронного излучения 2-го поколения. В 1980–1990-х гг. активно велись разработка и строительство источников уже 3-го поколения. Проводимые в это время исследования показали, что можно достичь меньших эмиттансов электронного пучка при переходе на более сложные магнитооптические структуры типа *multi bend achromat* (MBA). Однако уровень развития технологий того времени не позволял достигать впечатляющих результатов от использования новых структур. Поэтому для минимизации рисков при запуске новых источников синхротронного излучения 3-го поколения в их основе продолжали использовать структуры типа DBA.

Впервые магнитооптическая структура типа MBA была реализована при создании источника синхротронного излучения MAX-IV [2]. Использование высокоточных малоапертурных магнитов позволило увеличить градиенты магнитных полей, уменьшить длину магнитов и тем самым добиться существенного уменьшения эмиттанса электронного пучка. Вообще говоря, малые апертуры магнитных элементов являются главной особенностью всех магнитооптических структур типа MBA, обеспечивающих сверхмалый эмиттанс.

Реализация проекта и физический запуск MAX-IV подвигли научное сообщество к проведению активных исследований по возможностям модернизации действующих источников синхротронного излучения во всем мире. Полная модернизация источников синхротронного излучения позволяет в короткие сроки и с минимальным бюджетом существенно расширить экспериментальные возможности и улучшить потребительские свойства установки, при этом сохранив все экспериментальные станции.

Исследования, проведенные на зарубежных передовых источниках синхротронного излучения 3-го поколения (ESRF, SLS, APS, Spring-8, PETRA-III и др.), показывают, что в результате полной модернизации основного накопителя за счет использования более сложных магнитных систем возможно уменьшение одного из основных параметров — эмиттанса электронного пучка — в 10–30 раз при условии сохранения всех экспериментальных станций [3, 4].

Переход от простых структур типа DBA — классических магнитооптических структур, используемых в источниках 2-го и 3-го поколений (ESRF, курчатовский источник синхротронного излучения и др.), к структурам типа MBA (MAX-IV, Sirius и др.) совместно с достигнутым прогрессом в технологиях магнитных и вакуумных систем позволил усовершенствовать классическую структуру типа MBA и достичь еще более впечатляющих результатов в проекте модернизации источника синхротронного излучения ESRF [3]. Для минимизации эмиттанса, удовлетворения требования сохранения всех каналов вывода синхротронного излучения и экспериментальных станций после модернизации, а также других технических требований здесь используются сложные дипольные магниты разной конфигурации на длине суперпериода (в отличие от классической магнитооптической структуры типа MBA) и специальные двухполюсные излучатели. Для зануления дисперсионной функции в прямолинейных промежутках и сохранения минимального эмиттанса используется пара специальных дипольных магнитов с продольным градиентом магнитного поля. Кроме того, эта же пара поворотных магнитов создает специальный вынос дисперсионной функции, который позволяет использовать слабые секступольные линзы для компенсации хроматизма.

Одним из самых последних вариантов модификации структуры типа MBA, обеспечивающей еще большее уменьшение эмиттанса, является проект модернизации источника синхротронного излучения SLS [4]. В этом проекте планируется использовать одновременно как магнит с суперповоротом (superbend), так и магнит с антиповоротом (antibend). Первые представляют собой дипольные магниты с большим значением магнитного поля в центре и быстро спадающим к краю, а вторые имеют магнитное поле противоположного знака.

В результате модернизации и перехода на новые магнитооптические структуры у источников синхротронного излучения 3-го поколения, таких как ESRF, SLS, APS и др., существенно улучшатся потребительские свойства, а по основным достигнутым параметрам их можно будет отнести к источникам 3-го поколения.

Для действующего курчатовского источника синхротронного излучения возможен переход со структуры типа DBA на MBA с сохранением всех экспериментальных станций. Несмотря на то, что в настоящее время используются длинные ( $\sim 1,2$  м) поворотные магниты с полем 1,7 Тл, возможно добиться существенного уменьшения эмиттанса (как минимум в 10 раз). Основными магнитными элементами должны стать так называемые сэндвич-магниты с продольным градиентом поля и магниты с совмещенными функциями. В результате можно ожидать эмиттанс электронного пучка в основном накопителе на уровне 1–5 нм·рад с энергией 2,5 ГэВ. Уменьшение энергии электронного пучка вплоть до 2,0 ГэВ может оказаться компромиссным решением при стремлении упростить магнитную систему, уменьшить эмиттанс электронного пучка, увеличить яркость излучения. В результате такой модернизации для курчатовского источника синхротронного излучения можно достичь параметров, соответствующих современным источникам 3-го поколения.

### **ДИФРАКЦИОННО-ОГРАНИЧЕННЫЙ ИСТОЧНИК 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ**

Идеализированный список основных требований, предъявляемых к рентгеновским источникам 4-го поколения, был принят относительно давно [5], в него входят:

- достижение дифракционно-ограниченного источника на длине волны 1 Å;

- максимально достижимая пространственная когерентность;
- максимально достижимая временная когерентность;
- средняя яркость источника не менее  $10^{23-24}$  фотон  $\cdot$  с $^{-1}$   $\cdot$  мм $^{-2}$   $\cdot$  мрад $^{-2}$   $\cdot$   $(\Delta\lambda/\lambda = 0,1\%)^{-1}$ ;
- пиковая яркость источника не менее  $10^{33}$  фотон  $\cdot$  с $^{-1}$   $\cdot$  мм $^{-2}$   $\cdot$  мрад $^{-2}$   $\cdot$   $(\Delta\lambda/\lambda = 0,1\%)^{-1}$ ;
- высокая долговременная пространственная и временная стабильность;
- одновременная работа большого количества экспериментальных станций.

Чтобы обеспечить указанные параметры или хотя бы приблизиться к ним, необходимо решить множество научных, технических и технологических задач при разработке магнитооптических структур и других систем источников синхротронного излучения.

Сегодня в мире существует пока только один источник синхротронного излучения, по своим параметрам близкий к источникам 4-го поколения, — это лазер на свободных электронах European XFEL на базе линейного ускорителя с энергией электронов 17 ГэВ. Однако благодаря прогрессу в области физики и техники ускорителей, появлению эффективных алгоритмов моделирования магнитных полей и динамики частиц, повышению точности измерения параметров пучка, развитию новых технологий получения высокого вакуума источники синхротронного излучения на основе электронных накопителей стали оптимальным кандидатом для источника 4-го поколения. Но стоит отметить, что вследствие квантового характера излучения в накопителях электронов эмиттанс имеет фундаментальный предел, ограничивающий требование полной пространственной когерентности излучения [6].

Современные источники синхротронного излучения на основе накопителей электронов работают в основном в двух диапазонах энергий электронного пучка — 3 ГэВ (например, MAX-IV, Sirius, NSLS) и 6 ГэВ (например, ESRF, PETRA-III, APS). В табл. 1 приведены основные параметры некоторых квазидифракционно-ограниченных источников синхротронного излучения на базе электронных накопителей. Отметим, что в силу особенностей физических процессов, протекающих в электронном пучке, таких как внутрисгустковое рассеяние электронов друг на друге, турбулентное удлинение электронных сгустков в накопителях, работа при более высоких энергиях позволяет достигать меньших поперечных и продольных эмиттансов (размеров сгустков), хотя периметр самой установки в этом случае значительно увеличивается.

Главное требование, предъявляемое к разрабатываемой магнитооптической структуре, — существенное продвижение к созданию дифракционно-ограниченного источника на длине волны 1 Å. Для того, чтобы достичь дифракционно-ограниченный предел на длине волны 1 Å, необходимо иметь эмиттанс электронного пучка в источнике не более 8 пм  $\cdot$  рад. Еще один немаловажный параметр — степень когерентности — напрямую зависит от эмиттанса электронного пучка. В обзоре [7] приводится пример зависимости степени когерентности излучения из ондулятора от эмиттанса электронного пучка и длины волны излучения. Так, для длины волны излучения 1 Å при эмиттансе порядка 60 пм  $\cdot$  рад степень когерентности составляет всего несколько процентов. А при эмиттансе порядка 10 пм  $\cdot$  рад степень когерентности достигает 50 %, что уже является очень хорошим результатом.

В качестве прототипа для магнитооптической структуры нового дифракционно-ограниченного источника была выбрана модернизированная структура SLS-II. Для достижения энергии 6 ГэВ, эмиттанса 10 пм  $\cdot$  рад и получения динамической апертуры, доста-

Таблица 1. Основные параметры квазидифракционно-ограниченных источников синхротронного излучения

Название	Энергия, ГэВ	Периметр	Эмиттанс, пм · рад
MAX-IV	3,0	528	330
Sirius	3,0	518	280
Diamond-II	3,0	561	125
ALS-U	2,0	196	109
ELETRA-U	2,0	260	280
SLS-II	2,4	288	132
ESRF EBS	6,0	844	140
APS-U	6,0	1104	65
Spring-8-II	6,0	1320	150
PETRA-IV	6,0	2300	30

точной для инъекции и приемлемого времени жизни электронного пучка, выбор был остановлен на количестве суперпериодов, равном 48.

Основным элементом суперпериода является регулярная ячейка, состоящая из так называемого сэндвич-магнита и двух сдвинутых в горизонтальной плоскости квадрупольных линз. Сэндвич-магнит представляет собой магнит с продольным градиентом магнитного поля в центральной части, а по краям располагаются магниты с совмещенными функциями. Сдвинутые в горизонтальной плоскости квадрупольные линзы обеспечивают одновременно *antibend* и фокусировку. Один суперпериод образуется из пяти таких регулярных ячеек и двух специальных ячеек — так называемых подавителей, которые расположены по краям. Подавитель (обеспечивает зануление дисперсионной функции) состоит из половины регулярной ячейки, триплета (для согласования бетатронных функций) из квадрупольных линз и прямолинейного промежутка (для постановки вставных устройств). Для компенсации хроматизма используются секступольные линзы, расположенные в регулярной ячейке, а для увеличения динамической апертуры используются гармонические секступольные линзы, расположенные в триплетах.

Таблица 2. Основные параметры нового дифракционно-ограниченного источника синхротронного излучения

Параметр	Значение
Энергия, ГэВ	6
Периметр, м	2218
Количество суперпериодов	48
Эмиттанс, пм · рад	10

В результате проведенной оптимизации получен вариант удовлетворительной магнитооптической структуры, оптические функции которой представлены на рис. 1, а основные параметры — в табл. 2.

С целью оптимизации инъекции было решено сделать два специализированных промежутка с большой горизонтальной бета-функцией (24,3 м). В результате проделанной оптимизации получилась относительно большая динамическая апертура (рис. 2). Энергетический аксептанс составляет не менее  $\pm 1\%$  (рис. 3) и ограничивается, в первую очередь, размером динамической апертуры.

Одним из факторов, ограничивающих величину накапливаемого тока электронного пучка и эмиттанса, являются внутрисгустковые эффекты. Ослабить влияние внутри-

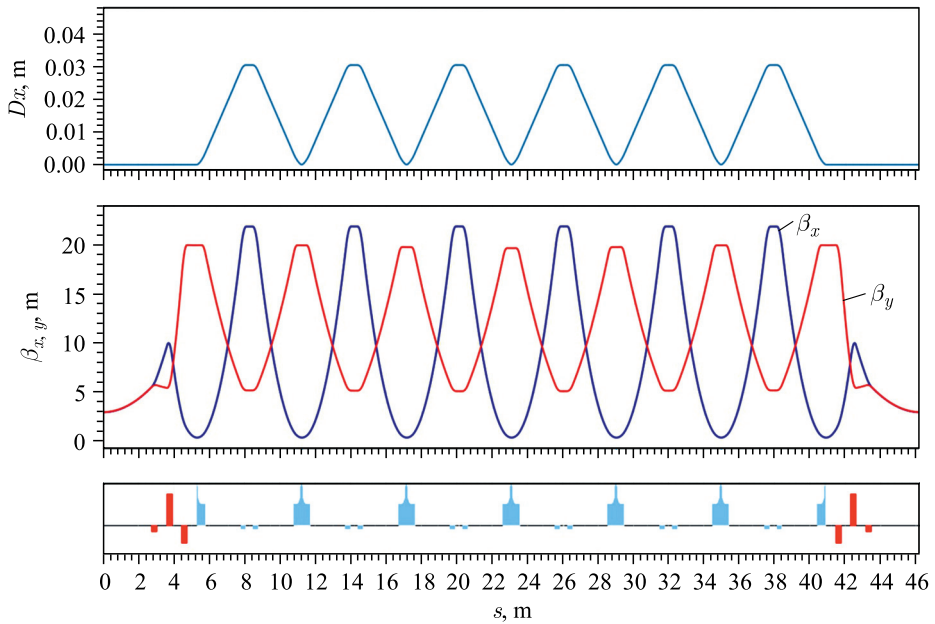


Рис. 1. Оптические функции на длине суперпериода дифракционно-ограниченного источника синхротронного излучения

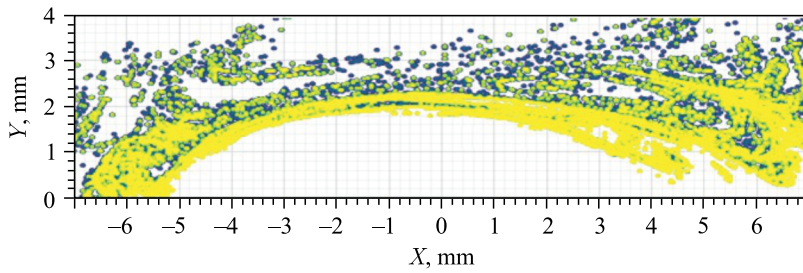


Рис. 2. Динамическая апертура в центре инжекционного промежутка дифракционно-ограниченного источника синхротронного излучения

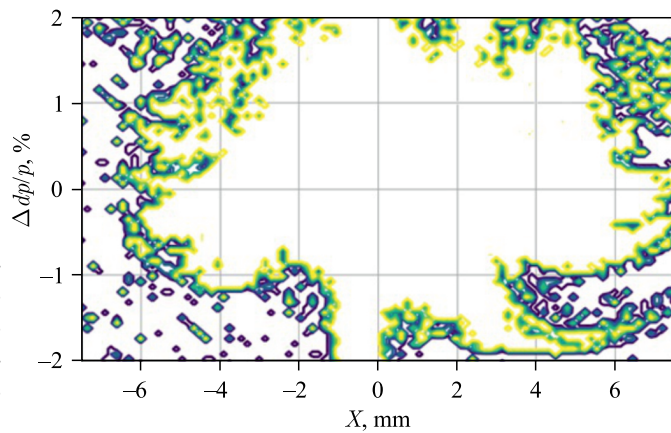


Рис. 3. Энергетический аксептанс в центре инжекционного промежутка дифракционно-ограниченного источника синхротронного излучения

сгустковых эффектов и при этом сохранить средний ток можно за счет использования ускоряющих ВЧ-резонаторов, работающих на более высокой частоте электромагнитных колебаний. Еще одной возможностью уменьшения влияния внутрисгустковых эффектов является использование пассивного ВЧ-резонатора, работающего на гармонике частоты ускоряющей ВЧ-системы и обеспечивающего дополнительное удлинение электронных

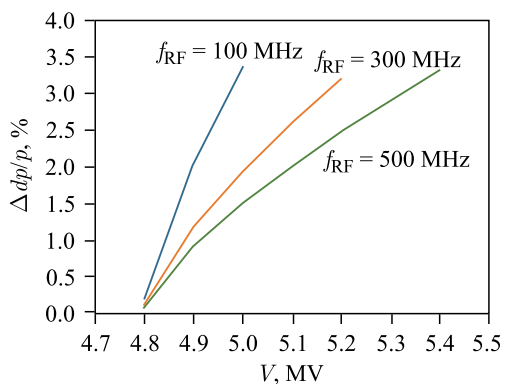


Рис. 4. Зависимость ВЧ-акцептанса от напряжения и частоты ВЧ

сгустков в продольном направлении. Однако окончательный выбор частоты ускоряющей ВЧ-системы и пассивного ВЧ-резонатора необходимо сделать после проведения тщательного моделирования динамики электронного пучка с учетом внутрисгустковых эффектов и параметров ВЧ-резонаторов.

С точки зрения достижения необходимого ВЧ-акцептанса (как минимум больше 1 %) заметного преимущества от использования какой-то определенной частоты ускоряющей ВЧ-системы нет. Необходимый акцептанс достигается относительно небольшим изменением ВЧ-напряжения (рис. 4).

Периметр кольца 6-ГэВ накопителя получился достаточно внушительным (2,2 км), но, несмотря на это, он не является критически большим. В любом случае создание подобных мегаустановок требует огромных вложений как физических, так и финансовых на протяжении длительного периода времени. А работа подобных комплексов должна удовлетворять потребностям экспериментаторов не только сегодня, но и в ближайшем, и в далеком будущем. Предсказать, как изменится вектор развития науки и техники, какие появятся новые актуальные задачи через 20–30 лет, невозможно. Но, как показывает практика, чем больше установка по своим размерам, тем имеется больше возможностей для ее модернизации с приходом новых знаний и технологий. Поэтому дополнительные вложения на первоначальном этапе в создание установки позволят в будущем иметь гораздо больше маневров для удовлетворения новых потребностей пользователей синхротронного излучения.

Полученная магнитооптическая структура источника синхротронного излучения нового поколения является хорошей отправной точкой для дальнейшей более детальной оптимизации эмиттанса, размера динамической апертуры, периметра установки, промежутков для постановки вставных устройств с учетом влияния на движение электронного пучка вставных устройств, эффектов внутрисгусткового рассеяния, неустойчивостей, ошибок выставки магнитных элементов и др.

## ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСТОЧНИКА 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Инжекцию электронного пучка в полученную магнитооптическую структуру источника синхротронного излучения можно обеспечить двумя способами: первый — это инжекция из отдельно стоящего бустерного синхротрона на полную энергию, второй — из линейного ускорителя на полную энергию. Преимуществом использования бустерного

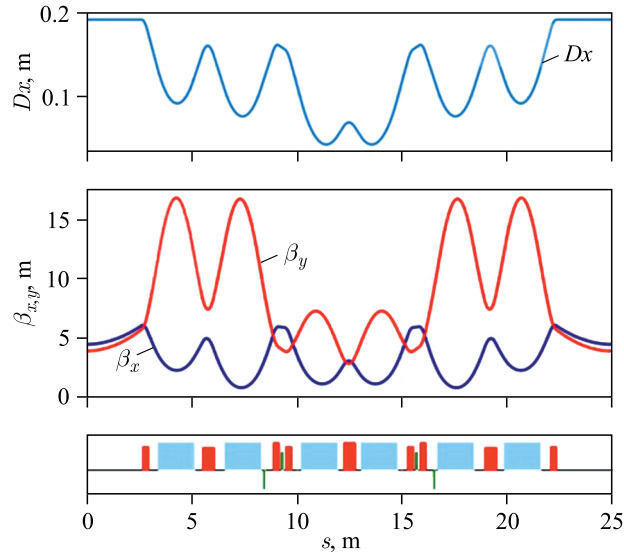


Рис. 5. Оптические функции на длине суперпериода бустерного синхротрона

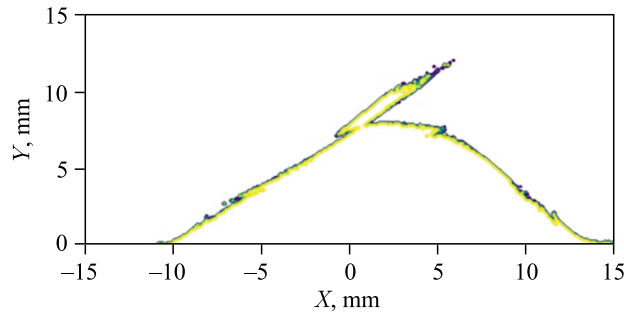


Рис. 6. Динамическая апертура в центре инжекционного промежутка

синхротрона является относительная компактность и простота инжекционной системы. Использование линейного ускорителя в качестве инжектора будет иметь неоспоримое преимущество, если кроме источника синхротронного излучения на основе накопителя электронов будет создаваться лазер на свободных электронах.

Поскольку для обеспечения работы основного накопителя к инженерным системам предъявляются очень жесткие требования, такие как высокая температурная стабильность и отсутствие вибраций в помещении, высокая стабильность питания магнитных элементов и т.д., то вариант использования в качестве инжектора бустерного синхротрона, расположенного в одном туннеле с основным накопителем, не является целесообразным. Действительно, наличие рядом с основным накопителем установки, работающей в импульсном режиме, будет оказывать влияние на его работу и может привести к невозможности достижения проектных параметров.

Для эффективной инжекции электронного пучка бустерный синхротрон должен работать в диапазоне энергий 0,5/1,0–6 ГэВ и иметь эмиттанс электронного пучка в диапазоне 1–10 нм · рад. Для достижения этих параметров при минимальных размерах установки



и получения удовлетворительного размера динамической апертуры периметр бустерного синхротрона должен составлять 300–500 м.

За основу магнитооптической структуры бустерного синхротрона была выбрана структура типа МВА с шестью одинаковыми магнитами с совмещенными функциями. Выбранная магнитооптическая структура является компромиссным решением проблем получения требуемого эмиттанта электронного пучка, обеспечения компактности бустерного синхротрона с учетом сложности магнитных элементов.

В результате проведенной оптимизации был получен потенциальный вариант магнитооптической структуры бустерного синхротрона. Его оптические функции представлены на рис. 5, а динамическая апертура — на рис. 6. Магнитооптическая структура имеет 12 суперпериодов, периметр составляет 299,99 м, а эмиттанс электронного пучка — 4,98 нм · рад, что является вполне удовлетворительным для обеспечения эффективной инжекции в полученную магнитооптическую структуру основного источника синхротронного излучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный вариант дифракционно-ограниченного источника синхротронного излучения на базе накопителя электронов по своим основным параметрам претендует на полноценный источник 4-го поколения и может составить конкуренцию большинству мировых проектов источников синхротронного излучения, находящихся также на стадии концептуального дизайна. Создание такого источника потребует больших финансовых вложений и долговременных усилий высококвалифицированных специалистов. В результате в долгосрочной перспективе на базе комплекса, включающего дифракционно-ограниченный источник, каналы вывода излучения и экспериментальные станции, возникнет междисциплинарный научный центр коллективного пользования для проведения исследований мирового уровня.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.616.21.0086 от 24.12.2017), ID RFMEFI61617X0086.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anashin V. *et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 282. P. 369.
2. MAX-IV Conceptual Design Report. MAX-lab. 2006.
3. ESRF Upgrade Program Phase II (2015–2022). Technical Design Study. ESRF, 2014.
4. SLS-2 Conceptual Design Report. PSI-Bericht, 2017.
5. Falcone R. *et al.* Scientific Needs for Future X-Ray Sources in the U.S. Lawrence Berkeley National Laboratory. SLAC, 2008.
6. Hofmann A. The Physics of Synchrotron Radiation. Cambridge Univ. Press, 2004.
7. Korchuganov V. The Main Problems and Its Solutions in Modern SR Sources // Proc. of RuPAC, 2018.