

НОВАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. А. Фомин¹, В. Н. Корчуганов

Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается проект модернизации действующего источника синхротронного излучения второго поколения. Целью проекта является создание нового источника синхротронного излучения в существующей геометрии (периметр 124 м), обеспечивающего переход к параметрам пучков синхротронного излучения, присущим источникам третьего поколения (эмиттанс ~ 3 нм·рад). Новый комплекс будет состоять из источника синхротронного излучения — накопительного кольца на энергию электронов 2,5 ГэВ, 0,2–2,5 ГэВ бустерного синхротрона и 0,2 ГэВ линейного ускорителя. Обязательным требованием к новому проекту является сохранение всех действующих в настоящее время экспериментальных станций. В работе рассматривается концепция новой магнитной структуры, основные проблемы, с которыми пришлось столкнуться на пути разработки новой структуры, и пути их решения.

Nowadays the upgrade project of the 2nd generation synchrotron radiation source operating at NRC “Kurchatov Institute” has been ongoing. The main aim of the project is to create a new synchrotron radiation source with the same 124-m circumference and providing synchrotron radiation properties inherent to the 3rd generation sources (emittance ~ 3 nm·rad). The new machine will consist of new storage ring with 2.5-GeV electron energy, full energy booster synchrotron and 0.2-GeV linac. The mandatory requirement for the project is to keep all currently operating beamlines. In this article, we present the design challenges and approaches for this machine, the conceptual design and baseline lattice.

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

ВВЕДЕНИЕ

Курчатовский источник синхротронного излучения является источником поколения 2+ с горизонтальным эмиттансом 98 нм·рад. Периметр основного накопителя составляет 124,13 м. В настоящее время на комплексе работают 13 экспериментальных станций и еще 4 находятся в стадии строительства. Основным источником синхротронного излучения являются поворотные магниты с полем 1,7 Тл с характеристической энергией фотонов 7,2 кэВ. Для расширения экспериментальных возможностей

¹E-mail: yafomin@gmail.com

комплекса в прямолинейные промежутки основного накопителя установлены 3 сверхпроводящих вигглера (один с максимальным полем 7,5 Тл и два — с полем 3 Тл).

Компоновка комплекса позволяет выводить синхротронное излучение равномерно по всему периметру основного накопителя. Имеется два типа пучковых линий: один — для жесткого рентгеновского излучения из поворотных магнитов и вигглеров, а другой — для ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения из слабополевых вставных устройств. Спектральный диапазон синхротронного излучения перекрывает интервал длин волн от 0,1 до 2000 Å. Работа на эксперимент проводится на энергии электронов 2,5 ГэВ и с током электронов 100–200 мА. При этом время жизни электронов в накопителе достигает 20–30 ч.

Действующая магнитная структура основного накопителя является модифицированной структурой типа DBA и состоит из 6 суперпериодов, каждый из которых содержит по два 3-м промежутка для постановки сильнополевых сверхпроводящих вигглеров и резонаторов ВЧ-питания (промежутки с нулевой дисперсией), слабополевых вигглеров, элементов системы инжекции (промежутки с ненулевой дисперсией) [1–3].

В целях реализации Указа Президента Российской Федерации от 25 июля 2019 г. № 356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации», постановления Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 г. № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации на 2019–2027 гг.» НИЦ «Курчатовский институт» приступил к осуществлению программы модернизации Курчатовского источника синхротронного излучения. Целью модернизации является создание нового инжекционного комплекса на энергию 2,5 ГэВ и нового накопителя с энергией электронов 2,5 ГэВ и эмиттансом электронного пучка не более 5 нм·рад. Параметры нового источника синхротронного излучения будут соответствовать параметрам источников третьего поколения. При этом интенсивность пучков синхротронного излучения нового источника должна быть не ниже, а яркость в десятки и сотни раз выше по сравнению с этими же величинами, получаемыми в настоящее время на действующем источнике.

Новый инжекционный комплекс состоит из бустерного синхротрона на энергию 2,5 ГэВ и линейного ускорителя на энергию 200 МэВ с электронно-оптическими каналами инжекции/экстракции. Новый накопитель и бустерный синхротрон будут смонтированы в существующем кольцевом туннеле радиационной биозащиты на месте ныне действующего накопителя, а линейный ускоритель будет установлен в зале работающих в настоящее время 450-МэВ малого накопителя и 80-МэВ линейного ускорителя.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НОВОЙ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЕ

Магнитная структура типа DBA (Double Bend Achromat) была разработана в середине 1970-х гг. Р. Часман и Г. Грином и легла в основу источников синхротронного излучения второго и третьего поколений [4, 5]. Развитие технологий в области создания магнитных, вакуумных, ВЧ-систем, моделирования электромагнитных полей и динамики электронного пучка создали возможности для строительства источни-

ков синхротронного излучения с использованием магнитных структур типа МВА (Multy Bend Achromat). Использование сложных и высокоточных магнитных элементов в этих структурах позволяет достигать эмиттансов на 2 и более порядка меньше, чем в структурах типа DBA, в одних и тех же геометрических размерах накопителей. Первыми успешно реализованными проектами являются проект MAX-IV [6] и проект модернизации ESRF — проект ESRF EBS [7]. Также заслуживают внимания проекты, находящиеся в различной стадии готовности, — это проект SLS-2 [8] и самый амбициозный на сегодня проект PETRA-IV [9], который, благодаря использованию идей ESRF, наиболее близок к достижению дифракционно-ограниченного источника на длине волны 1 Å.

На основе последних достижений в области ускорительной техники и с учетом мирового опыта модернизации действующих источников синхротронного излучения были сформулированы основные требования, предъявляемые к новой магнитной структуре Курчатовского источника синхротронного излучения:

- сохранение всех действующих в настоящее время 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.

НОВАЯ МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА ОСНОВНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Курчатовский источник синхротронного излучения является одним из самых компактных в мире. Малый периметр основного накопителя достигается за счет использования поворотных магнитов с большим значением магнитного поля (1,7 Тл). Этот факт накладывает очень жесткие технологические ограничения. Например, невозможность использования магнитов с продольным градиентом поля, ограничения на использование магнитов с совмещенными функциями, необходимость очень плотного размещения элементов магнитной системы, системы диагностики, вакуумной системы, системы впуска электронного пучка с вытекающими отсюда последствиями. В нашем случае для уменьшения эмиттанса при сохранении геометрических размеров накопителя эффективно использовать «сэндвич-магниты» и магниты с «антиповоротом» [10, 11].

По результатам проведенных исследований для Курчатовского источника синхротронного излучения оптимальным вариантом является магнитная структура, состоящая из двух модифицированных ячеек типа ЗВА (Triple Bend Achromat), каждая из которых содержит 3 поворотных магнита с полем 2 Тл, 4 диполь-квадрупольных магнита (магниты с совмещенными функциями, тип 1), 4 диполь-квадрупольных магнита с антиповоротом (магниты с совмещенными функциями, тип 2), два дублета квадрупольных линз. Накопительное кольцо образуется из 6 суперпериодов. Для сравнения

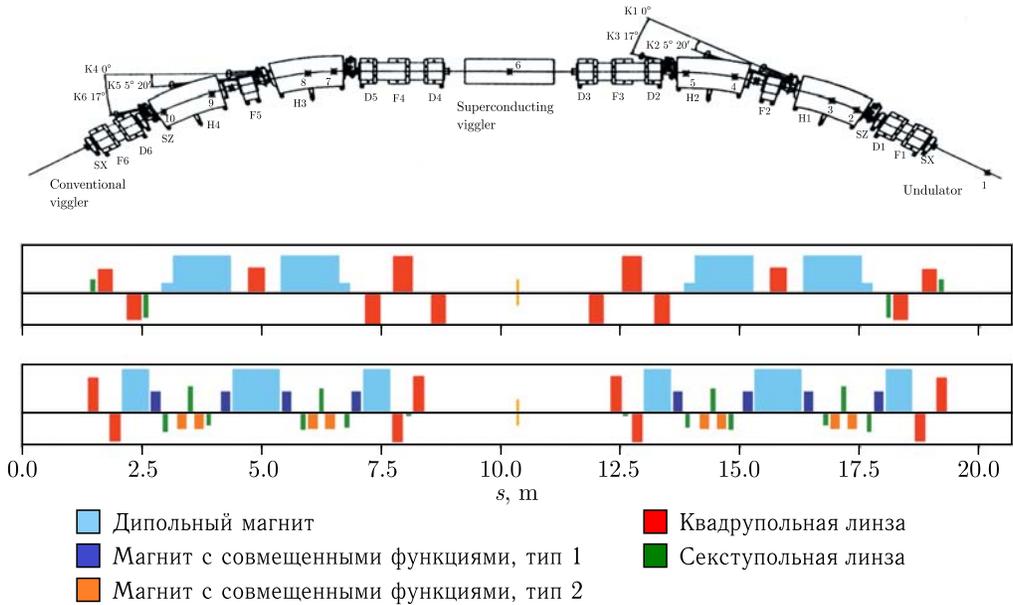


Рис. 1. Действующая (вверху) и новая (внизу) магнитная структура Курчатовского источника синхротронного излучения. Для действующей структуры показаны каналы вывода синхротронного излучения под углами 0° , $5^\circ 20'$, 17°

расположение и типы используемых магнитных элементов в новой и действующей структурах на длине одного суперпериода приведены на рис. 1.

Для того чтобы максимально минимизировать эмиттанс в новой структуре, пришлось отойти от жесткого выполнения некоторых вышеуказанных требований к ней, а именно от полного сохранения периметра накопителя и сохранения положений прямолинейных промежутков. Выполнение этих требований не позволяет получить эмиттанс электронного пучка менее $10 \text{ нм} \cdot \text{рад}$. Кроме того, для увеличения расстояния между элементами было увеличено поле в поворотных магнитах с 1,7 до 2,0 Тл.

Отказ от жесткого выполнения этих требований вполне возможен. В настоящее время экспериментальные станции, работающие с пучками синхротронного излучения из сверхпроводящих вигглеров, находятся на стадии строительства или модернизации, и обеспечить на данном этапе их параллельный перенос на необходимое расстояние осуществимо, а имеющаяся ВЧ-система позволяет обеспечить работу основного накопителя при изменении периметра вплоть до $\pm 100 \text{ мм}$. Увеличение величины 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 по оптимизации и настройке магнитной структуры перевешивают.

Использование в новой структуре магнитов с относительно большим магнитным полем в «антиповороте» позволило, с одной стороны, существенно уменьшить эмиттанс электронного пучка, но с другой — привело к существенному увеличению потерь электронами энергии на синхротронное излучение и увеличению энергетического разброса. В отсутствие вставных устройств имеющаяся ВЧ-система способна компенси-

ровать потери энергии электронов на синхротронное излучение в новой структуре в штатном режиме. Однако при включении всех вставных устройств (до 9) 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. В таблице приведены основные параметры новой и старой структур. Оптические функции в новой структуре приведены на рис. 2.

Основные параметры Курчатовского источника синхротронного излучения до и после модернизации

Параметр	В настоящее время	После модернизации
Энергия, ГэВ	0,45–2,5	2,5
Периметр, м	124,130	124,174
Количество суперпериодов	6	6
Эмиттанс, нм · рад	97,7	2,86
Энергетический разброс	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$
Частоты бетатронных колебаний ν_x/ν_y	7,7877 / 6,6965	14,85293 / 6,75516
Натуральный хроматизм ξ_x/ξ_y	-16,7 / -12,8	-29,3 / -27,1
Потери энергии на оборот, кэВ	680,7	925,4
Времена затухания $\tau_x/\tau_y/\tau_s$, мс	3,172 / 3,041 / 1,490	0,955 / 2,238 / 3,404
Количество промежутков для постановки вигглеров	5	9
Количество экспериментальных станций из поворотных магнитов	До 24	До 36

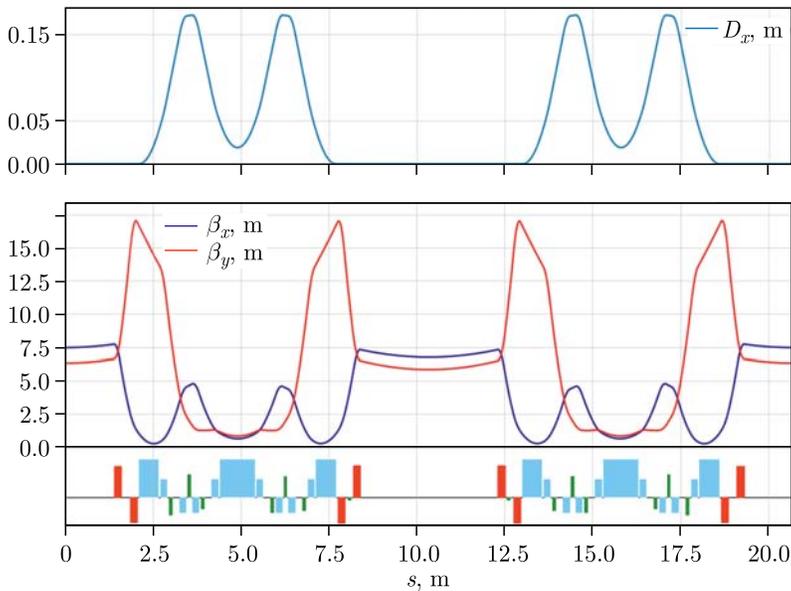


Рис. 2. Оптические функции на длине одного суперпериода

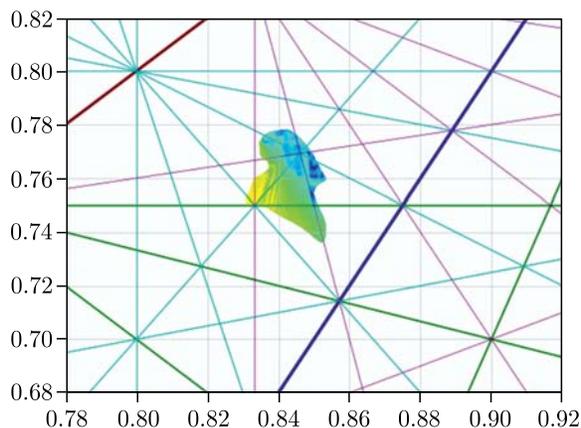


Рис. 3. Смещение рабочей точки на диаграмме частот в зависимости от амплитуды колебаний электронов внутри области ± 11 мм по горизонтали и ± 8 мм по вертикали

Положение рабочей точки на диаграмме частот бетатронных колебаний показано на рис. 3. Рабочая точка удалена от резонансов 1–3-го порядков на достаточное расстояние. В отсутствие пересечений опасных резонансов бетатронное движение электронов остается устойчивым на амплитудах до ± 11 мм по горизонтали и ± 8 мм по вертикали и с отклонением импульса от равновесного значения до 2,5–3,5 %.

В новой магнитной структуре оба прямолинейных промежутка имеют нулевую дисперсионную функцию, и поэтому они могут быть использованы для постановки как слабополевых вигглеров, так и сильнополевых вигглеров и шифтеров. Кроме того, появилась возможность увеличить количество экспериментальных станций, работающих с пучками синхротронного излучения, выведенных из поворотных магнитов. Особенностью структуры являются близкие значения бета-функций в прямолинейных промежутках. Это позволит при работе на 100%-й связи горизонтальных и вертикальных бетатронных колебаний иметь круглые пучки синхротронного излучения из вставных устройств и, тем самым, расширить экспериментальные возможности комплекса.

Достижение малых эмиттансов требует создания более короткофокусных магнитооптических структур, обладающих увеличенным натуральным хроматизмом. Как следствие, возникает необходимость увеличения сил секступольных линз, применяемых для его компенсации. Это, в свою очередь, приводит к более сильному нелинейному движению электронов, к появлению большого количества резонансов и к уменьшению размеров динамической апертуры.

Для компенсации натурального хроматизма, увеличения размера динамической апертуры и минимизации сдвига частот бетатронных колебаний в зависимости от амплитуды бетатронных колебаний и отклонения импульса от равновесного значения было использовано 6 семейств хроматических линз и 1 семейство гармонических линз. Силы всех линз были оптимизированы с целью минимизации влияния нелинейных эффектов на динамику электронного пучка.

На рис. 4 приведена динамическая апертура в центре инжекционного промежутка в отсутствие ошибок. Вертикальный размер динамической апертуры составляет

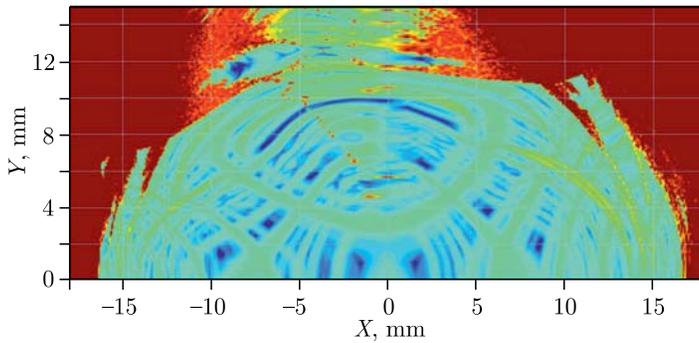


Рис. 4. Динамическая апертура в центре инжекционного промежутка

12 мм, а горизонтальный — 16 мм, что является достаточным для осуществления инъекции электронного пучка.

Основным фактором, приводящим к искажению замкнутой орбиты электронного пучка и уменьшению размера динамической апертуры, являются ошибки выставки магнитных элементов в поперечной плоскости. 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 коррекции размер динамической апертуры восстанавливается практически до исходного размера в отсутствие ошибок, а искажения замкнутой орбиты не превышают размера электронного сгустка.

Для коррекции замкнутой орбиты в каждом суперпериоде предполагается использовать до 16 корректоров для коррекции горизонтальных отклонений орбиты и до 8 — вертикальных отклонений орбиты. Из-за плотной компоновки магнитовакуумных элементов нового источника синхротронного излучения места для расположения сосредоточенных корректоров практически отсутствуют. Поэтому корректоры совмещаются с основными магнитными элементами. Для осуществления коррекции горизонтальной орбиты будут использоваться магнитные поля, возбуждаемые токами в дополнительных катушках, размещенных на ярмах в фокусирующих квадрупольных линзах и в обоих типах магнитов с совмещенными функциями. Для коррекции вертикальной орбиты будут использоваться поля, создаваемые токами в дополнительных катушках дефокусирующих квадрупольных линз и в магнитах с антиповоротом. Для локальной коррекции орбиты во вставных устройствах по краям прямолинейных промежутков будут установлены сосредоточенные корректора.

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 10–50 раз. Отметим, что вклад дисперсионного члена в размеры пучков синхротронного излучения из поворотных магнитов за счет вклада увеличенного энергетического разброса в поперечный размер электронного пучка остается близким к вкладу за счет натурального эмиттанса (как и в старой структуре) и не является определяющим факто-

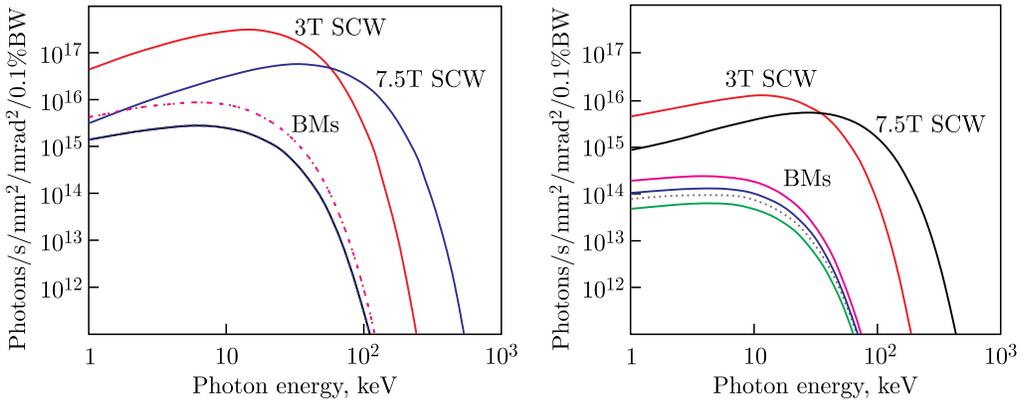


Рис. 5. Сравнение спектральных характеристик синхротронного излучения из различных устройств в действующей (справа) и новой (слева) структурах Курчатовского источника синхротронного излучения при энергии электронов 2,5 ГэВ и токе 100 мА, связи 10%. BMs — поворотные магниты, 3Т SCW — 3-Тл сверхпроводящий вигглер, 7,5Т SCW — 7,5-Тл сверхпроводящий вигглер

ром, ограничивающим спектральную яркость синхротронного излучения. Сравнение спектральных характеристик синхротронного излучения из различных устройств в действующей и новой структурах приведено на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученная новая магнитная структура (в пересчете на свои геометрические размеры и энергию электронного пучка) обеспечивает как параметры пучков синхротронного излучения на уровне самых передовых источников (строящихся и разрабатываемых), так и достаточно оптимальное соотношение достигаемых параметров к технической сложности проекта.

Для успешной реализации проекта необходимо уделить очень пристальное внимание разработке и оптимизации магнитных элементов, которые должны быть выполнены и установлены на свои места с высокой точностью. Вакуумная система, за счет наличия в магнитной структуре магнитов с антиповоротом и малыми апертурами, требует тщательной проработки ее геометрии, системы вакуумной откачки и охлаждения камеры, мест локальной защиты элементов, размещенных внутри вакуумной камеры, от излучения. Также немаловажным является вопрос долговременной температурной стабилизации в туннеле основного накопителя, так как там будет располагаться периодически работающий бустерный синхротрон. Тем не менее все сложности реализации проекта при использовании передовых технологий в ускорительной технике являются преодолимыми.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-12039.

Результаты исследования получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчуганов В.Н. Разработка и создание специализированных источников СИ. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2001.
2. Anashin V. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 282. P. 369.
3. Валентинов А.Г. и др. Магнитная система накопителя «Сибирь-2» — специализированного источника СИ. Препринт ИЯФ 89-174. М., 1989.
4. Chasman R., Green G.K., Rowe E.M. Preliminary Design of a Dedicated Synchrotron Radiation Facility // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. V. 22, No. 3. P. 1765.
5. Chasman R., Green G.K. Design of a National Dedicated Synchrotron Radiation Facility. OSTI 7334216. 1976.
6. MAX-IV Conceptual Design Report. MAX-lab.
7. ESRF Upgrade Program Phase II (2015–2022). Technical Design Study. ESRF, 2014.
8. SLS-2 Conceptual Design Report. PSI-Bericht, 2017.
9. Agapov I. et al. Lattice Design for PETRA-IV: Towards a Diffraction-Limited Storage Ring // 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources, 2018.
10. Fomin Ye., Korchuganov V. Kurchatov Synchrotron Radiation Source — from the 2nd to the 4th Generation // Proc. of RuPAC2018, Protvino, Russia, 2018.
11. Левичев Е. Б. Накопители электронов с малым эмиттансом // УФН. 2018. Т. 188. С. 31–54.

Получено 29 октября 2021 г.