

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕ ОСЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ
ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО СИНХРОТРОНА “СИЛА”

© 2025 г. В. С. Дюбков^{a, b, *}

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

^bНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: vsdyubkov@meophi.ru

Поступила в редакцию 28.05.2024 г.

После доработки 28.05.2024 г.

Принята к публикации 04.06.2024 г.

На базе НИЦ “Курчатовский институт” в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры производится разработка источника синхротронного излучения 4-го поколения на базе накопительного электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ и лазера на свободных электронах на основе “теплого” линейного ускорителя, который будет использоваться и как инжектор электронов для накопительного синхротрона. Неотъемлемой частью накопительного синхротрона является инжекционная система, обеспечивающая ввод электронных сгустков в синхротрон. Требование к схеме инжекции, помимо высокой эффективности инжекции и сохранения высокого качества пучка, состоит в том, чтобы свести к минимуму пространство, которое необходимо для размещения ее компонентов и обеспечить точную повторяемость параметров ее магнитных элементов. Инжекция электронов с энергией 6 ГэВ предъявляет жесткие требования к импульсным кикер магнитам ввиду короткой длительности импульса (~3 мкс) подаваемого на них высокого напряжения. Выполнено моделирование процесса многооборотной горизонтальной инжекции с помощью инжекционной системы состоящей из септум и четырех кикер магнитов.

Ключевые слова: источник синхротронного излучения, эмиттанс пучка, кольцевой накопитель, магнитная структура, инжекция, аксептанс, бетатронные колебания, динамика частиц, резонанс

DOI: 10.56304/S2079562924060113

1. ВВЕДЕНИЕ

Накопительный синхротрон “СИЛА”, создаваемый на базе НИЦ КИ, рассчитан на энергию электронов 6 ГэВ с равновесным значением горизонтального эмиттанса 72 пм·рад. Особенностью проекта “СИЛА” является объединение высоко-энергичного кольцевого источника синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения и рентгеновского лазера на свободных электронах в единый ускорительно-накопительный комплекс с общей исследовательской инфраструктурой [1]. Предполагается, что на первоначальном этапе эксплуатации синхротрона ввод электронных сгустков будет реализован посредством многооборотной инжекции в горизонтальное фазовое пространство накопителя из линейного резонансного ускорителя при энергии эксперимента (top-up/top-off инжекция) 6 ГэВ, который будет использоваться еще и как драйвер для лазера на свободных электронах. Достоинствами такого подхода являются высокая (более 99%) эффективность инжекции в накопительное кольцо и возможность получения пучка с

заметно меньшим эмиттансом при инжекции по сравнению с бустерной схемой.

2. ИНЖЕКЦИЯ В НАКОПИТЕЛЬ

В качестве top-up инжектора будет использован линейный резонансный ускоритель с рабочей частотой 2.8 ГГц [2], разработка которого в настоящее время выполняется АО “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова” [3]. Накопительный синхротрон “СИЛА” будет состоять из 40 участков (суперпериодов) равной длины, два из которых будут использоваться для ввода электронных сгустков посредством канала транспортировки из линейного ускорителя, от одного до трех участков (их свободных промежутков) – для размещения ВЧ резонаторов, компенсирующих потери энергии электронами на СИ, и два участка будут использованы для размещения диагностического оборудования. Прочие участки должны быть отведены под нужды пользователей СИ. В работе [4] выполнен расчет магнитооптической структуры (типа hybrid seven bend achromat, разработанной в ESRF [5], Франция) накопи-

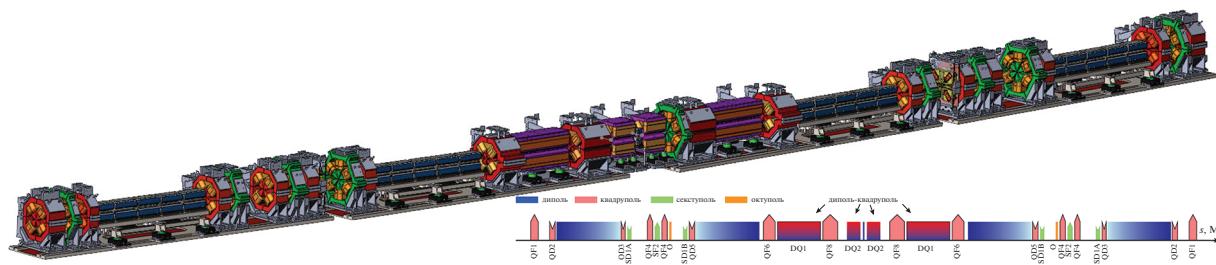


Рис. 1. Магнитная структура регулярного суперпериода накопителя “СИЛА”.

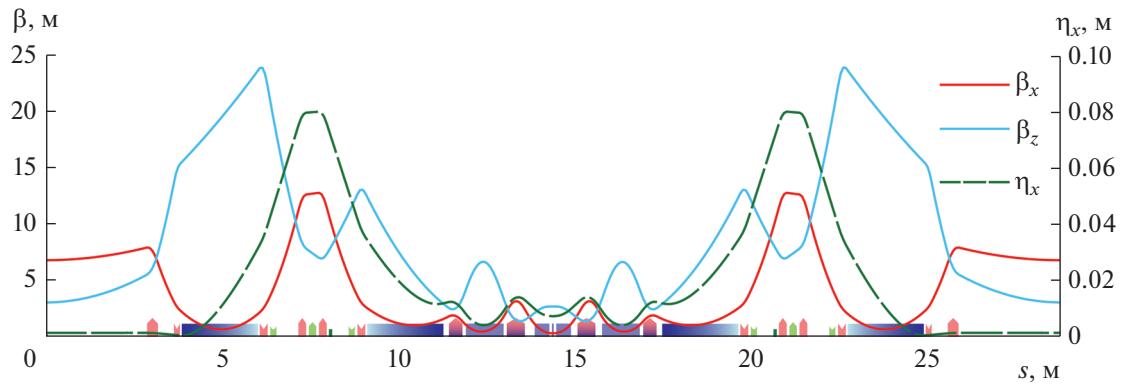


Рис. 2. Оптические функции регулярного суперпериода накопителя.

теля при переходе на рабочую частоту ВЧ резонаторов 350 МГц с сохранением проектных параметров установки. 3D модель регулярного суперпериода представлена на рис. 1, а поведение оптических функций на длине регулярного суперпериода – на рис. 2. В табл. 1 представлены основные параметры накопителя “СИЛА”. Расчеты произведены с использованием программ *AT* [6] и *elegant* [7]. На рис. 3 представлена трехмерная модель

двух суперпериодов используемых для осуществления инжекции в горизонтальное фазовое пространство.

Два периода накопителя, отведенные для осуществления проверенной и хорошо зарекомендовавшей себя вне осевой инжекции с использованием четырех кикер-магнитов [8–12], имеют измененную по отношению к остальным 38 периодам

Таблица 1. Основные параметры накопителя “СИЛА”

Параметр	Значение
Периметр, м	1110.1
Число суперпериодов	40
Равновесный горизонтальный эмиттанс, пм · рад	71.9
Относительный энергетический разброс	$8.51 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент пространственного расширения орбит	$5.72 \cdot 10^{-5}$
Длина электронного сгустка при нулевом токе, мм	2.2
Приведенные бетатронные частоты (горизонт., вертикальн.)	95.21, 33.34
Хроматичности (горизонт., вертикальн.)	8, 6
Потери энергии электронным сгустком за один оборот, МэВ/оборот	1.99
Суммарное амплитудное значение ВЧ напряжение резонаторов, МВ	8
Кратность	1296
Максимальный накопленный ток, мА	200
Время затухания колебаний (горизонт., вертикальн.), мс	14.68, 22.27

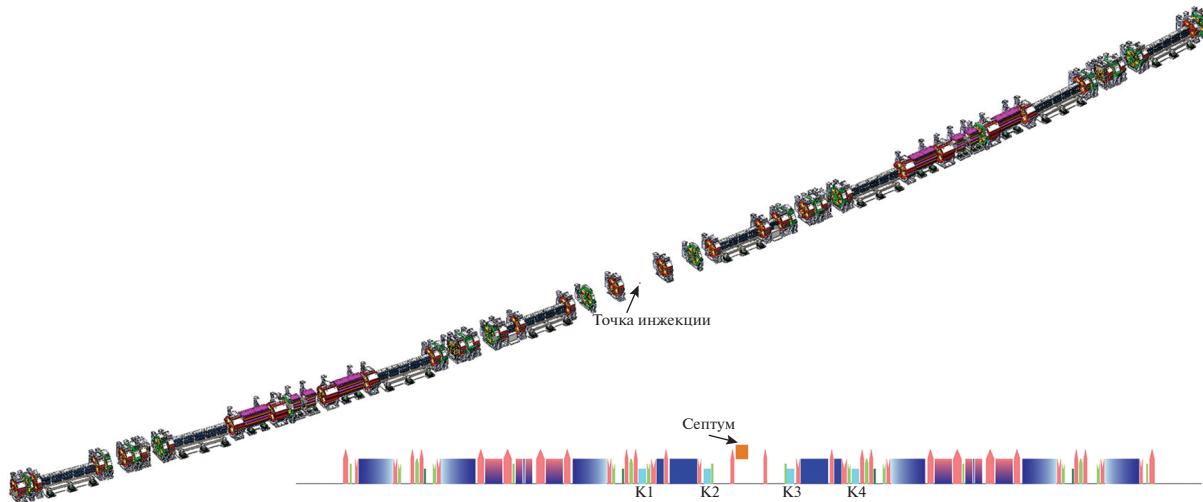


Рис. 3. 3D модель инжекционных суперпериодов накопителя “СИЛА”.

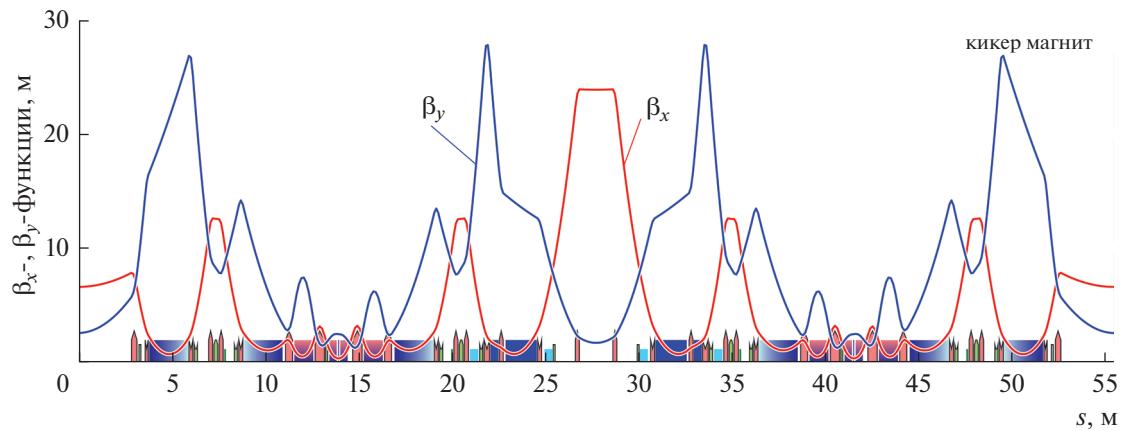


Рис. 4. Оптические функции инжекционных периодов.

магнитную структуру. Система из четырех кикеров позволяет с высокой точностью формировать локальное искажение орбиты, обеспечивая ее необходимое отклонение от равновесной орбиты и угол наклона касательной к искаженной орбите в точке инжекции. Отметим, что горизонтальная инжек-

ция позволяет использовать вакуумные камеры малого вертикального размера, что упрощает разработку встраиваемых устройств таких, как ондуляторы и вигглеры в том числе. Оптические функции на длине двух инжекционных периодов представлены на рис. 4, а на рис. 5 предложено локальное

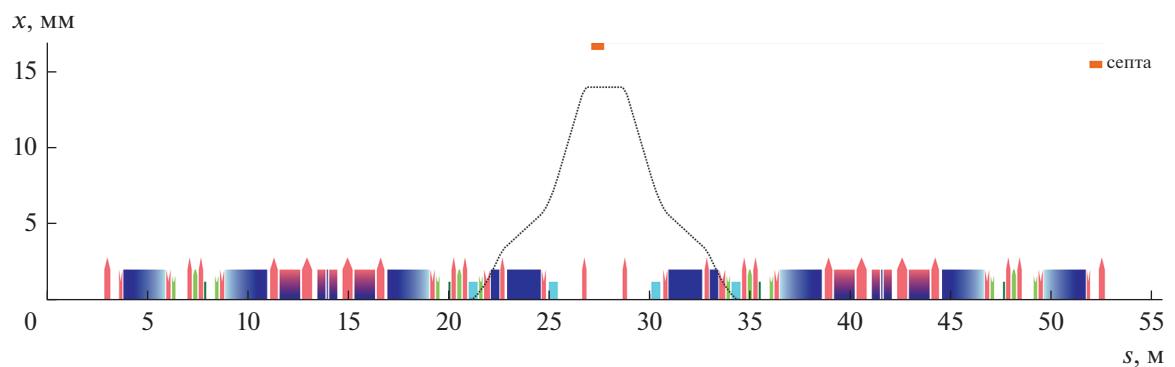


Рис. 5. Горизонтальное искажение замкнутой орбиты при инжекции.

Таблица 2. К расчету углов отклонения траектории кикер-магнитами

$\beta(s_1)$, м	$\beta(s_2)$, м	$\beta(s_i)$, м	$\int_{s_1}^{s_2} \beta^{-1} ds$	$\int_{s_1}^{s_i} \beta^{-1} ds$	$\int_{s_2}^{s_i} \beta^{-1} ds$	ψ_1 , мрад	ψ_2 , мрад
7.91	6.69	25.48	2.55	2.71	0.16	1.75	1.74

отклонение замкнутой орбиты высотой 14 мм, которая является достаточной для эффективной (более 95%) top-up инжекции электронных сгустков из проектируемого линейного ускорителя с термо- и фото- (преимущественно при работе на лазер на свободных электронах) пушками. В перспективе возможен переход к инжекции с использованием как мультипольных [13–15], так и нелинейных кикер магнитов, как это реализовано, например, на бразильском источнике синхротронного излучения 4-го поколения Sirius [16–19].

Выбор величины смещения равновесной орбиты в точке инжекции определяется параметрами септум магнита (септа – перегородка, разделяющая пространство на части), горизонтальным размером поперечного сечения вакуумной камеры в точке инжекции, а также областью хорошего поля, расположенного первым за септумом магнитооптическим элементом. На текущий момент времени выбор конкретной реализации септум магнита не произведен в следствии чего расчет параметров инжекции выполнен на основании параметров септум магнита, используемого в “прапорительской” установке ESRF-EBS [8].

Предварительно выполнен аналитический расчет индукции магнитного поля кикер-магнитов. Задаваясь необходимой высотой смещения замкну-

той орбиты в точке инжекции и используя известную матрицу передачи между двумя произвольными точками s_l и s_n магнитооптической структуры [20–23]

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix},$$

где элементы матрицы

$$\begin{aligned} m_{11} &= \sqrt{\beta(s_n)/\beta(s_l)} \times \\ &\times \left[\cos \left(\int_{s_l}^{s_n} ds/\beta \right) + 0.5 \dot{\beta}(s_l) \sin \left(\int_{s_n}^{s_l} ds/\beta \right) \right]; \\ m_{12} &= \sqrt{\beta(s_l)\beta(s_n)} \sin \left(\int_{s_l}^{s_n} ds/\beta \right); \\ 2(\dot{\beta}(s_l) - \dot{\beta}(s_n)) \cos \left(\int_{s_l}^{s_n} ds/\beta \right) + & \\ + (4 + \dot{\beta}(s_l) \dot{\beta}(s_n)) \sin \left(\int_{s_n}^{s_l} ds/\beta \right); \\ m_{21} &= -\frac{4\sqrt{\beta(s_l)\beta(s_n)}}{4\sqrt{\beta(s_l)\beta(s_n)}}, \\ m_{22} &= \sqrt{\beta(s_l)/\beta(s_n)} \times \\ &\times \left[\cos \left(\int_{s_n}^{s_l} ds/\beta \right) + 0.5 \dot{\beta}(s_n) \sin \left(\int_{s_l}^{s_n} ds/\beta \right) \right], \quad \dot{\beta} = d\beta/ds, \end{aligned} \quad (1)$$

для случая симметричного расположения оптических элементов инжекционных периодов относительно точки ввода электронных сгустков и их параллельном, по отношению к равновесной орбите, вводе, имеем значения углов отклонения траектории накапленного (циркулирующего) пучка каждым из четырех кикер-магнитов

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \frac{\Delta x}{\sqrt{\beta(s_1)\beta(s_i)}} \frac{\cos \left(\int_{s_2}^{s_1} \beta^{-1} ds \right)}{\sin \left(\int_{s_2}^{s_1} \beta^{-1} ds \right)}, \\ \psi_2 &= \frac{\Delta x}{\sqrt{\beta(s_2)\beta(s_i)}} \frac{\cos \left(\int_{s_1}^{s_2} \beta^{-1} ds \right)}{\sin \left(\int_{s_1}^{s_2} \beta^{-1} ds \right)}, \\ \psi_3 &= \psi_2, \quad \psi_4 = \psi_1, \end{aligned} \quad (2)$$

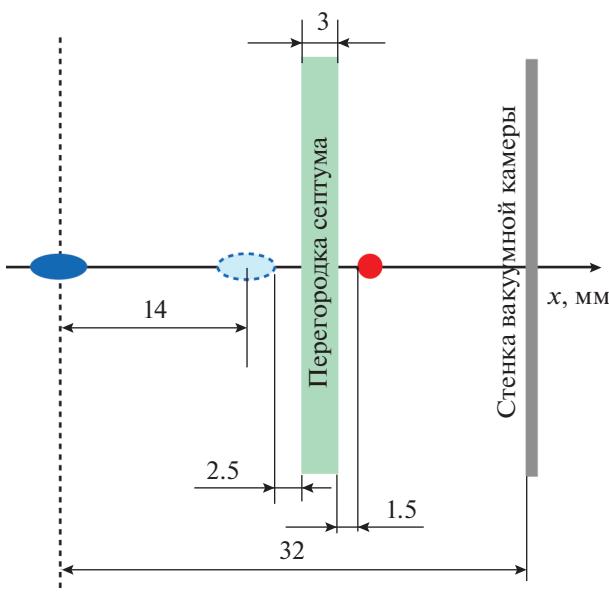


Рис. 6. Расположение циркулирующего и инжектируемого пучков в точке инжекции.

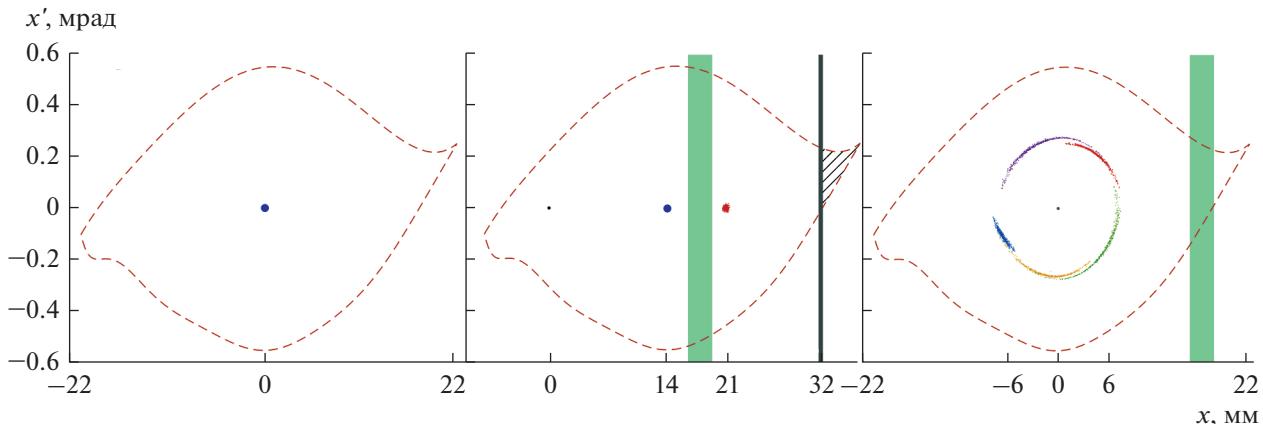


Рис. 7. Горизонтальное фазовое пространство (слева – до инжекции, по центру – при инжекции, справа – последовательные 5 оборотов введенного пучка после инжекции).

где s_1 и s_2 – координаты центров кикер-магнитов в системе координат Френе–Серра (ускорительной системе координат), s_i – координата точки инжекции (конечного края септум-магнита), Δx – требуемое отклонение замкнутой орбиты при $s = s_i$. Из выражений (2) видно, что для уменьшения значений Ψ_j , $j = 1, 4$, при заданном Δx следует добавляться возможно больших значений $\beta(s_i)$ при проектировании инжекционных периодов.

Значения углов поворота траектории кикер-магнитами при выбранных параметрах магнито-оптических элементов накопительного синхротрона “СИЛА” [4] и $\Delta x = 14$ мм приведены в табл. 2. Приведенные в табл. 2 значения углов поворота кикер-магнитов длиной 44 см каждый соответствует индукция магнитного поля около 0.08 Тл.

На рис. 6 приведено схематическое изображение взаимного расположения накопленного и вводимого пучков в момент инжекции относительно элементов накопителя.

Рисунок 7 иллюстрируют процесс ввода электронного сгустка в поперечное фазовое пространство (пунктирной кривой обозначена граница горизонтального акцептанса накопителя). Поперечный акцептанс составляет 29 мм·мрад. На рис. 8 представлено поперечное сечение инжектируемого пучка в момент инжекции и спустя первые пять последовательных оборотов в накопителе. При моделировании предполагалось, что центр тяжести вводимого в накопитель сгустка находится на удалении от невозмущенной замкнутой орбиты в 21 мм, в сгустке содержится 1024 частицы, радиационные эффекты учтены, распределение частиц гауссово, заряд сгустка – 0.55 нКл, что соответствует режиму работы накопителя с равномерным заполнением. Поперечные среднеквадратичные (RMS) эмиттансы инжектиру-

емого пучка предполагались равными 1 нм·рад, RMS длина сгустка 0.3 мм при работе с фотопушкой и 6 мм при работе линейного ускорителя с термопушкой, энергетический разброс $\pm 0.05\%$, горизонтальный и вертикальный размеры пучка 286 мкм и 72 мкм соответственно, угловые разбросы (горизонтальный и вертикальный) ± 4.75 мкрад и ± 16.05 мкрад. Импульсный сигнал возбуждения кикеров предполагается прямоугольным с длительностью 3 мкс. Результат моделирования, представленный на рис. 7 справа, выполнен для идеально согласованного пучка и в отсутствии ошибок как нацеливания, смещения по координате и отклонения по импульсу, так и неточностей выставки магнитных элементов и их полей. Эффективность инжекции, т.е. отношение числа электронов, совершающих устойчивые бетатронные колебания после инжекции, к общему числу инжектированных частиц,

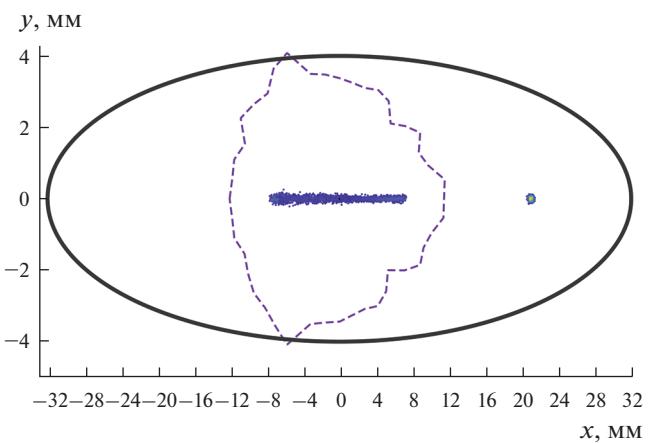


Рис. 8. Поперечное сечение накопителя на азимуте септум магнита (пунктирная кривая – динамическая апертура без учета ошибок оптических элементов и выключенных ВЧ резонаторах).

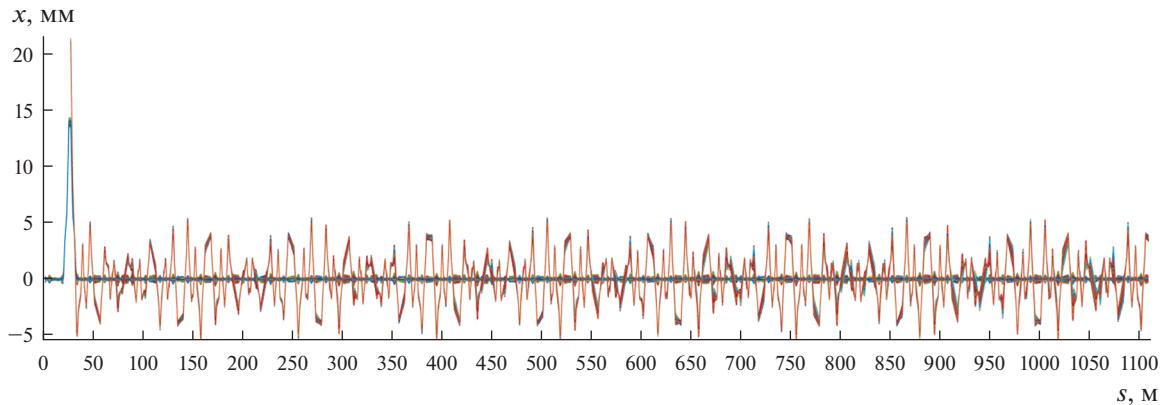


Рис. 9. Траектории частиц циркулирующего и инжектируемого пучков для согласованной инжекции на первом обороте.

составила более 99%. На рис. 9 представлен расчет траекторий накопленного и введенного пучков на первом обороте. Из рис. 10 видно, что начальная амплитуда горизонтальных бетатронных колебаний составляет порядка 5 мм, что влечет необходимость обеспечения соответствующей области “хорошего” поля во встраиваемых устройствах. Отметим, что при начальном горизонтальном отклонении вводимого сгустка от равновесной орбиты 17 мм, начальная амплитуда горизонтальных бетатронных колебаний составляет 2.5 мм. На рис. 11 показан фазовый портрет инжектированного пучка спустя 10000 оборотов (квантовая диффузия не учтена).

Как можно видеть из рис. 10 кикеры 1 и 2 “приводят” накопленный пучок, двигающийся по проектной орбите, в область нахождения “лезвия” (перегородки) септума, а кикеры 3 и 4 возвращают его на замкнутую орбиту вместе с инжектированным пучком, который совершают затухающие бетатронные колебания.

Из рис. 10 видно образование трех локальных вне осевых областей, около которых концентрируется незначительная часть изображающих точек инжектированного сгустка (менее 5%). Отметим, что указанные области не пересекаются изображающими точками в течение 10000 оборотов начиная с инжекции сгустка. Для того, чтобы вне осевые частицы сгустка не увеличивали тепловую нагрузку на септум необходимо предусмотреть коллиматор. На рис. 11 представлено изменение RMS горизонтального и вертикального размеров сгустка во времени, где обозначены моменты времени, отвечающие уменьшению размеров в \$e\$ раз.

Произведена оценка сдвига приведенных бетатронных частот для накопленного пучка с гауссовским распределением электронов и с зарядом 0.55 нКл из-за влияния его пространственного заряда в соответствии с выражением [23]

$$\Delta v = \frac{NLr_0c^2}{(2\pi)^{3/2} l_b \epsilon v^2 \gamma^3}, \quad (3)$$

где \$N\$ – число электронов в сгустке, \$L\$ – периметр синхротрона, \$r_0\$ – классический радиус электрона, \$c\$ – скорость света в вакууме, \$l_b\$ – длина сгустка, \$\epsilon\$ – геометрический эмиттанс пучка, \$v\$ – скорость сгустка, \$\gamma\$ – приведенная энергия сгустка. Несмотря на то, что \$\gamma = 11741.7\$, но ввиду чрезвычайно малых значений поперечных эмиттансов сгустка (единицы-десятки пм) источников СИ 4-го поколения, сдвиги бетатронных частот при рабочих значениях заряда в сгустке могут быть существенными. Так, при среднеквадратичной длине сгустка 0.3 мм, в соответствии с формулой (3), \$\Delta v_x = 0.017\$, а \$\Delta v_y = 0.247\$ при вертикальном эмиттансе пучка 5 пм. Диаграмма бетатронных резонансов с указанием положения рабочей точки накопителя “СИЛА” и ее смещения при указанных параметрах представлена на рис. 12.

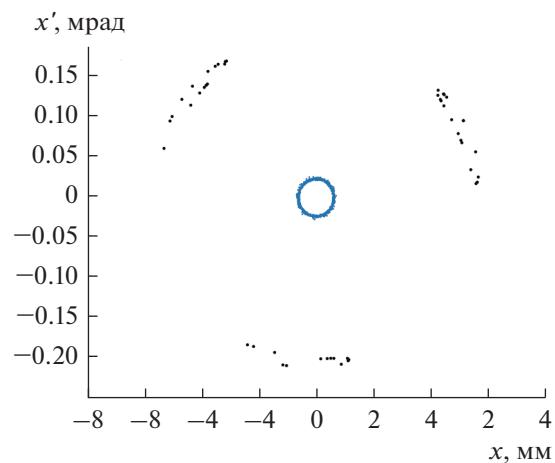


Рис. 10. Фазовый портрет инжектированного пучка спустя 10000 оборотов.

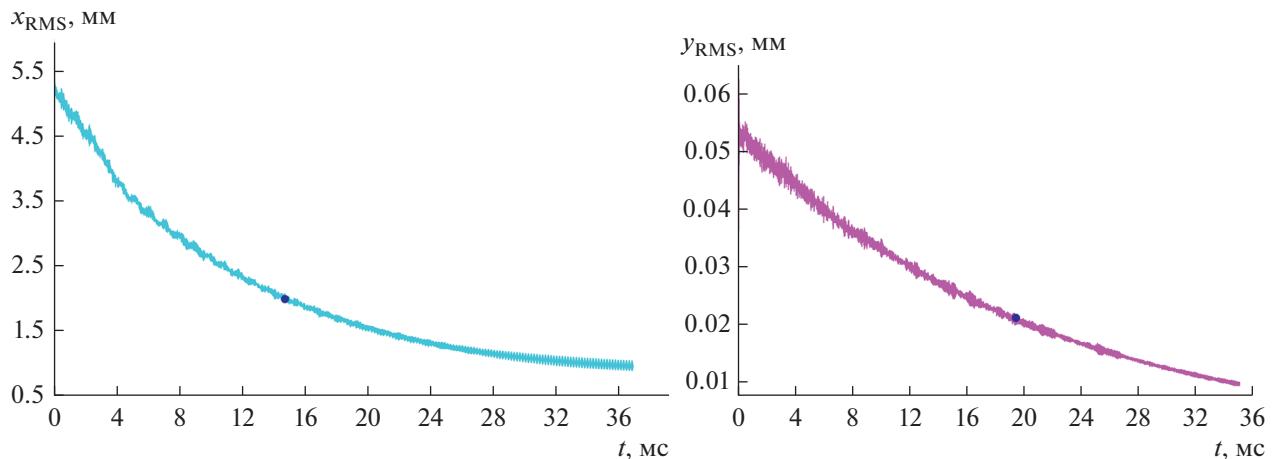


Рис. 11. Изменение RMS горизонтального и вертикального размера сгустка.

Выполнено моделирование инжекции сгустка с отклонением по энергии $\Delta W/W = \pm 0.25\%$. Результаты моделирования существенно не отличаются от представленных выше, потеря электронов не наблюдалось. В дальнейшем, с целью более эффективного использования магнитооптических элементов, выход септума будет смешен ближе к расположенной за ним квадрупольной линзе.

Как отмечалось, рабочая частота линейного ускорителя-инжектора в 8 раз выше рабочей частоты ВЧ резонаторов, что позволяет производить инжекцию нескольких сгустков из линейного ускорителя в любую из сепаратрис накопительного синхротрона “СИЛА” за один оборот, что может быть использовано в односгустковом режиме или режиме работы накопителя с несколькими сгустками с увеличенным зарядом в каждом (см. рис. 13). Так при значении равновесной фазы

поля ВЧ резонаторов накопителя $\phi_s = 165.58^\circ$, соответствующей компенсации потерь энергии сгустком на СИ, в любую из сепаратрис можно поместить до семи сгустков из линейного ускорителя.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для инжекции электронов в накопительный синхротрон 4-го поколения “СИЛА” будет отведено два суперпериода так, что один прямолинейный участок протяженностью около 5 м будет использован для размещения элементов системы инжекции, что позволит выполнять инжекцию практически незаметно для экспериментов с генерируемыми накопителем фотонными потоками. Рассмотрено использование инжекционной системы на основе септум и четырех кикер магнитов для ввода электронных сгустков в горизонтальное фазовое пространство накопительного синхротрона “СИЛА”. При значениях индукции магнитного поля идентичных кикер магнитов около 0.08 Тл обеспечивается эффективная (>95%) и устойчивая инжекция электронов из линейного ускорителя. Для поддержания постоянным значения накопленного заряда в накопителе частота инжекции может составлять несколько герц,

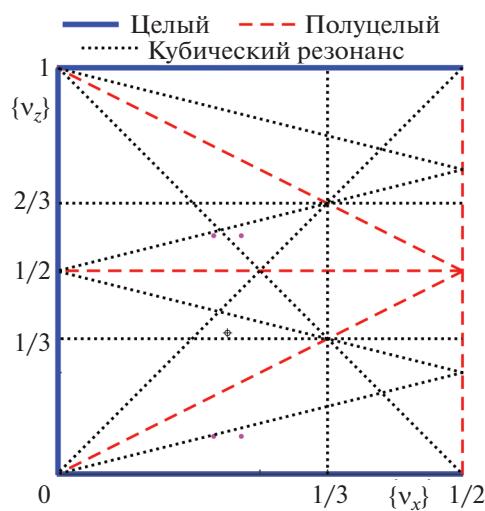


Рис. 12. Диаграмма резонансов (указаны дробные части частот).

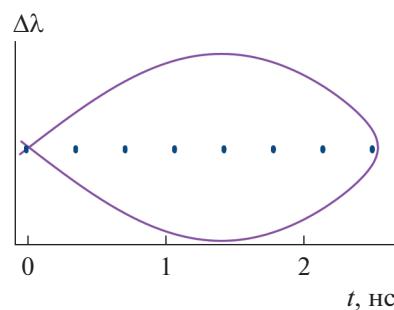


Рис. 13. Вариант заполнения сепаратрисы накопителя.

что определяется как временами затухания бетатронных колебаний вводимых сгустков, так и системой питания кикер магнитов. Важно отметить необходимость учета сдвига рабочей точки на диаграмме резонансов под действием поля пространственного заряда пучка и избегать таких зарядов сгустка, при которых рабочая точка сдвигается в область параметрического резонанса или резонанса третьего порядка. Несмотря на высокую энергию электронов в накопителе “СИЛА”, ввиду чрезвычайно малых эмиттансов сгустков сдвиги бетатронных частот оказываются существенными.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”, <http://ckp.nrcki.ru/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Ковалчук М.В. и др. // Кристаллография. 2022. Т. 67 (5). С. 726–734.
2. Polozov S.M., Kliuchevskaya Y.D., Ashanin I.A. // Abstr. LXXII Int. Conf. NUCLEUS-22. 2022. P. 344.
3. Gavrish Y. // Abstr. Conf. RuPAC’23. 2023. P. 164.
4. Дюбков В.С. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (5). С. 464 [Dyubkov V.S. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (12). P. 2703].
5. Liuzzo S.M. et al. // Proc. IPAC’21. Campinas, Brazil. 2021. P. 1462.
6. Rogers W. et al. // Proc. IPAC’17. Copenhagen, Denmark. 2017. P. 3855.
7. Borland M. // Proc. ICAP-2000. 2000. LS-287. P. 11.
8. EBS Storage Ring Technical Report. <https://www.esrf.fr>.
9. Owen H.L., Smith S.L. // Proc. EPAC'96. Sitges, Spain. 1996. P. 2400. <https://accelconf.web.cern.ch/e96/papers/mopl/mop040l.pdf>.
10. Zhang S. // Proc. PAC’09. Vancouver, Canada. 2009. P. 2324.
11. Акимов А.В. и др. Технологическая инфраструктура “СКИФ”. 2021. Новосибирск: Институт катализа СО РАН. Т. 2. С. 74–82.
12. Karantzoulis E. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2024. V. 1060. P. 169007.
13. Leemann S.C. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2012. V. 15. P. 050705.
14. Harada K. et al. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2007. V. 10. P. 123501.
15. Takaki H. et al. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2010. V. 13. P. 020705.
16. Atkinson T. et al. // Proc. IPAC’11. San Sebastian, Spain. 2011. P. 3394.
17. Rodrigues A.R.D. et al. // Proc. IPAC’18. Vancouver, Canada. 2018. P. 2886.
18. Quentino J.V., Alves M.B., de Sá F.H. // Proc. IPAC’22. Bangkok, Thailand. 2022. P. 2722.
19. Resende X.R. et al. // Proc. IPAC’22. Bangkok, Thailand. 2022. P. 2672.
20. Conte M., MacKay W.W. An Introduction to the Physics of Particle Accelerators. 2nd Ed. 2008. Singapore: World Scientific.
21. Wille K. The Physics of Particle Accelerators: An Introduction. 2009. Oxford: Oxford Univ. Press. 2009.
22. Wiedemann H. Particle Accelerator Physics. 4th Ed. 2019. Cham: Springer.
23. Lee S.Y. Accelerator Physics. 4th Ed. 2021. Singapore: World Scientific.

Simulation of Off-Axis Injection for the SYLA Storage Ring

V. S. Dyubkov^{1, 2, *}

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

² National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: vsdyubkov@mephi.ru

Received May 28, 2024; revised May 28, 2024; accepted June 4, 2024

Abstract—Within the framework of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Synchrotron and Neutron Research and Research Infrastructure, a fourth-generation synchrotron light source is under development at the National Research Center Kurchatov Institute. The source involves a 6 GeV storage ring and a free electron laser based on a normal conducting linear accelerator, which will also be used as an injector for the storage ring. An injection system is one of the main parts of the storage ring, which ensures the injection of electron bunches into the synchrotron. The injection system should have a high injection efficiency, hold a high beam quality, minimize the space required to accommodate its components, and ensure repeatability of the parameters of its magnetic elements. The injection of 6-GeV electrons imposes stringent requirements on pulsed kicker magnets because of the short pulse duration ($\sim 3 \mu\text{s}$) of the high voltage supply. The multturn horizontal injection has been simulated using an injection system consisting of a septum and four kicker magnets.

Keywords: synchrotron light source, beam emittance, storage ring, magnetic structure, injection, acceptance, betatron oscillations, particle dynamics, resonance