

КОРРЕКЦИЯ ВЛИЯНИЯ ВИГГЛЕРОВ И ОНДУЛЯТОРОВ НА ДИНАМИКУ ПУЧКА В ИСТОЧНИКЕ СИ ЦКП «СКИФ»

Г. Н. Баранов^{а, б, в}, Е. Б. Левичев^{а, б, в}, М. А. Скамароха^{а, б, 1}

^а Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

^б Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Чтобы получить более жесткий спектр, увеличить поток фотонов и яркость синхротронного излучения ЦКП «СКИФ», планируется использовать многополюсные сверхпроводящие вставные устройства — генераторы излучения (вигглеры и ондуляторы). Обладая коротким периодом и большой амплитудой магнитного поля, такие устройства оказывают серьезное влияние на оптику и динамику пучка электронов. Рассмотрены различные аспекты такого влияния (изменение радиационных параметров, искажение оптических функций, уменьшение динамической апертуры и т. д.), а также обсуждаются возможные варианты коррекции нежелательных последствий установки вигглеров и ондуляторов на накопитель СКИФ.

To obtain a harder energy spectrum, increase photon flux and brightness of synchrotron radiation of the SRF “SKIF” synchrotron light source, it is planned to use multipole superconducting insertion devices — radiation generators (wigglers and undulators). Having a short period and large amplitude of the magnetic field, such devices have a serious impact on the optics and dynamics of the electron beam. We consider various aspects of this influence (changes in radiation parameters, distortion of optical functions, and reduction in dynamic aperture) and discuss possible options for correcting the undesirable consequences of installing wigglers and undulators in the SKIF storage ring.

PACS: 41.60.Ar

ВВЕДЕНИЕ

Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») — новый источник синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения, сооружаемый в наукограде Кольцово (Новосибирская обл.). Ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ» включает линейный ускоритель электронов с энергией 200 МэВ, промежуточный синхротрон-бустер и накопительное кольцо с энергией 3 ГэВ и длиной орбиты 476 м. Проектный «естественный» (без вставных устройств и при нулевых токе пучка и связи мод бетатронных колебаний) горизонтальный эмиттанс пучка в накопителе равен 72,7 пм.

¹E-mail: m.a.skamarokha@inp.nsk.su

Разрабатываются и изготавливаются шесть экспериментальных станций первой очереди ЦКП «СКИФ» [1], для которых источниками излучения будут шесть вставных устройств (вигглеров и ондуляторов). Пять из них используют сверхпроводящие периодические магниты (что позволяет получать жесткое рентгеновское излучение), шестой ондулятор — электромагнитный спиральный для экспериментов с поляризованным СИ.

Значительная амплитуда и малый период магнитного поля сверхпроводящих устройств приводят к тому, что их влияние способно существенно ухудшить параметры пучка в накопителе СКИФ, и это влияние необходимо корректировать постановкой дополнительных квадрупольных линз. Влияние спирального ондулятора пренебрежимо, и далее мы его не рассматриваем.

Мы исследуем влияние сверхпроводящих магнитных вставных устройств на движение электронов в накопителе СКИФ аналитически и численно и предлагаем различные варианты коррекции такого влияния.

1. ИСТОЧНИК СИ СКИФ

Базовая магнитная структура накопителя состоит из 16 идентичных суперпериодов, разделенных длинными (6 м) прямолинейными промежутками. Магнитооптическая формула суперпериода — 7BA (7-bend achromat) обеспечивает экстремально малый эмиттанс при достаточно большой динамической апертуре [2].

Оптические функции суперпериода показаны на рис. 1, начало и конец графика соответствуют центрам прямолинейных промежутков. Основные параметры такой структуры без вставных устройств приводятся в [2].

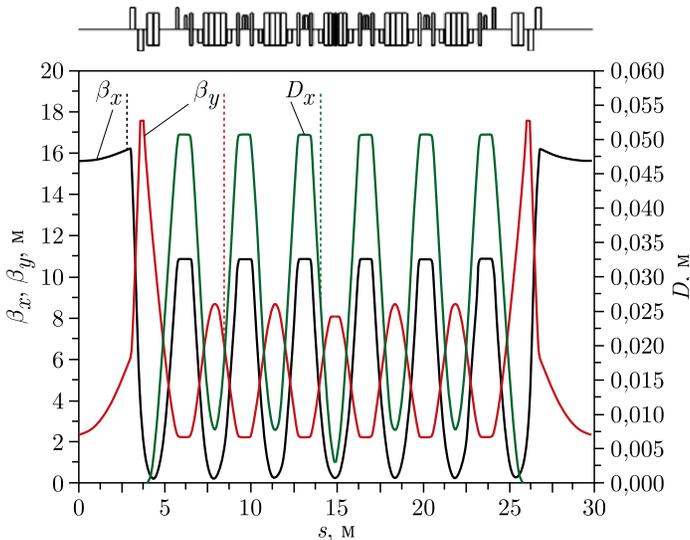


Рис. 1. Оптические функции и размещение основных магнитных элементов суперпериода базовой структуры накопителя СКИФ

Для более точной настройки условий минимизации эмиттанса мы применяем магниты с отрицательной кривизной поля [3], в качестве которых используются соответствующие квадрупольные линзы регулярной структуры, смещенные на несколько миллиметров относительно оси пучка.

Два прямолинейных промежутка предназначены для размещения ускоряющих высокочастотных резонаторов и оборудования инжекции. В оставшихся 14 предполагается установить генераторы излучения — вигглеры и ондуляторы. Для этого оптические функции в промежутках должны удовлетворять определенным условиям. Для уменьшения влияния сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов на оптику и нелинейную динамику пучка необходима малая вертикальная бетатронная функция [4]. Мощное излучение из сильнополевых устройств увеличивает радиационное трение и способно дополнительно уменьшить эмиттанс пучка (или предотвратить его увеличение вследствие внутрисгусткового кулоновского рассеяния) при определенном сочетании параметров — в частности, близкой к нулю дисперсионной функции и небольшой горизонтальной бетатронной функции. Малая горизонтальная бета в ондуляторах желательна и для максимизации яркости излучения, поскольку при эмиттансе, приближающемся к волновому пределу [5], приходится согласовывать фазовые эллипсы электронного и фотонного пучков так, чтобы [6]

$$\beta_x \approx \beta_r = \frac{L_u}{2\pi},$$

где L_u — длина ондулятора; β_x — бета-функция в центре ондулятора, а β_r — «бета-функция», соответствующая распределению фотонного пучка. При характерной $L_u \approx 2-3$ м величина горизонтальной β должна быть весьма малой, что противоречит условиям традиционной, надежной и эффективной инжекции с локальным импульсным искажением замкнутой орбиты (bimpr) в горизонтальной плоскости, которая требует достаточно большой динамической апертуры $A_x \propto \sqrt{\beta_x}$.

Для базовой структуры СКИФ мы выбрали в центре прямолинейных промежутков дисперсию, равную нулю, $\beta_x = 15,4$ м и $\beta_y = 2,4$ м. Такой выбор уменьшает возмущение линейного и нелинейного движения частиц полем вставных устройств и позволяет инжектировать пучок из синхротрона-бустера с эффективностью, близкой к 100%. В части влияния вигглеров и ондуляторов на эмиттанс пучка выбранная горизонтальная β является компромиссной: при ней горизонтальный эмиттанс (без учета кулоновского рассеяния) не уменьшается и не увеличивается, оставаясь на уровне $\varepsilon_x \approx 74-78$ пм, почти не завися от числа включенных вставных устройств. Это удобно для экспериментаторов, так как условия экспонирования образцов остаются постоянными.

Для получения в прямолинейном промежутке СКИФ приведенных выше бетатронных функций достаточно двух дублетов квадрупольных линз, размещенных по краям. Такое решение похоже на оптику суперпериода МАХ IV (напомним, однако, что «естественный» эмиттанс МАХ IV 330 пм) [7].

Получить оптическое решение, которое позволяет вставным устройствам уменьшить горизонтальный эмиттанс и увеличить яркость СИ, более точно согласовав распределения фотонного и электронного пучков в ондуляторе, можно, перейдя от квадрупольных дублетов к триплетам. Тогда в центре «триплетного» промежутка бетатронные функции будут равны 0,71 м по горизонтали и 3,97 м по вертикали.

При этом нарушение высокой симметрии кольца накопителя приводит к закономерному уменьшению поперечной динамической апертуры, и хотя для варианта, когда дублетный и триплетный промежутки чередуются, степень симметрии падает «все-го» в два раза (с 16-кратной до 8-кратной), а апертура уменьшается не критично (на 15–20%), было принято решение начать работу в менее рискованной базовой структуре, а возможность модернизации оптики промежутка рассматривать после приобретения опыта работы с беспрецедентно малым эмиттансом.

2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВСТАВНЫХ УСТРОЙСТВ

В табл. 1 приведены основные параметры вставных устройств первой очереди с обозначениями: SCU и SCW — сверхпроводящие ондулятор и вигглер, ЕЕМУ — электромагнитный эллиптический ондулятор. Цифрами обозначается номер экспериментальной станции. Кроме номера прямолинейного промежутка, где устанавливается устройство (первым считается промежуток инжекции), в табл. 1 приводятся амплитуда вертикального и горизонтального (есть только у электромагнитного ондулятора) поля, период, число основных периодов (без концевых полюсов), полная магнитная длина, межполюсной зазор и излучаемая мощность при токе 400 мА.

Вигглеры и ондуляторы могут менять различные параметры пучка, поскольку:

- дополнительное излучение в зависимости от параметров вставного устройства и оптических функций промежутка может приводить как к уменьшению, так и к росту эмиттанса пучка. Энергетический разброс только увеличивается;
- фокусировка частиц магнитным полем вставного устройства искажает оптические функции и изменяет рабочую точку бетатронных частот;
- поле вигглера или ондулятора на орбите пучка нелинейно, что приводит к зависимости частоты бетатронных колебаний от амплитуды, возбуждению бетатронных резонансов, уменьшению динамической апертуры и т. д.

Для косинусного распределения вертикального поля вдоль оси вигглера z (при рассмотрении только регулярных периодов)

$$B_y(x = y = 0, z) = B_w \cos(k_w z) = B_w \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_w} z\right), \quad (1)$$

Таблица 1. Параметры вставных устройств первой очереди [8, 9]

Параметр	Устройство					
	SCU1-1	SCU1-2	SCW1-3	SCU1-4	SCW1-5	ЕЕМУ1-6
Промежуток	10	13	16	3	8	15
B_y , Тл	1,25	1,25	2,7	1,6	4,5	0,49
B_x , Тл	—	—	—	—	—	0,05
λ_u , мм	15,6	15,6	27	18	48	212
$N_{\text{рег}}$	129	129	72	110	18	20
L_u , м	2,03	2,03	2,0	2,0	0,95	4,864
g , мм	7	7	7	7	7	19
P , кВт	7,7	7,7	33	11,7	40	1,9

где B_w и λ_w — амплитуда и период магнитного поля. Влияние на оптику кольца удобно оценить с помощью сдвига вертикальной бетатронной частоты (для однородного распределения поля вдоль оси x , что всегда стараются сделать правильной конструкцией полюсов, горизонтальная частота не меняется):

$$\Delta\nu_y = \frac{1}{8\pi} h_w^2 L_w \bar{\beta}_y, \quad (2)$$

где $\bar{\beta}_y$ — средняя по длине вигглера вертикальная бетатронная функция; L_w — длина вигглера и $h_w = \rho_w^{-1} = B_w/B\rho$ — кривизна орбиты в максимуме поля B_w .

Воспользовавшись (2), можно оценить сдвиг частоты из-за сверхпроводящих ондулятора и вигглера из табл. 1:

SCU1-4: $\Delta\nu_y \approx 6,14 \cdot 10^{-3}$,

SCW1-5: $\Delta\nu_y \approx 23 \cdot 10^{-3}$.

То есть возмущение оптики вигглером в несколько раз больше, чем ондулятором.

Другой класс эффектов связан с увеличением мощности СИ из-за вигглера. Это приводит к изменению «радиационных» параметров пучка (времени затухания бетатронных и синхротронных колебаний, эмиттанса, энергетического разброса и т. п.), которое удобно описывать с помощью так называемых «радиационных интегралов» [10]. Например, изменение горизонтального эмиттанса пучка из-за действия вигглера можно выразить в виде

$$r_\varepsilon = \frac{1 + I_{5w}/I_{50}}{1 + I_{2w}/I_{20}}, \quad (3)$$

где интегралы I_2 и I_5 отвечают за радиационное трение и квантовую раскачку соответственно, а индексы «0» и «w» относятся к магнитной структуре кольца и вигглера. Для поля (1) интегралы для вигглера с числом периодов N , длиной $L_w = \lambda_w N$ и горизонтальной бетатронной функцией в центре вигглера β_{xc} записываются как

$$I_{2w} = \frac{1}{2} h_w^2 L_w, \quad I_{5w} \approx \frac{8}{15} N \theta_w h_w^2 \left(\frac{5\eta_{w0}^2}{\beta_x} + \beta_{xc} \theta_w^2 \right). \quad (4)$$

Здесь $\theta_w = h_w/k_w$ — максимальный угол отклонения орбиты от оси змейки, а η_{w0} — дисперсионная функция в прямолинейном промежутке накопителя, куда ставится устройство. Из (4) видно, что для предотвращения роста эмиттанса нужно, чтобы первое слагаемое в скобках было много меньше правого, именно поэтому дисперсионную функцию в промежутке, где устанавливается мощный вигглер, стараются уменьшить до нуля. С этим условием (3) записывается при постановке I_{5w} и I_{2w} как

$$r_\varepsilon \approx \frac{1 + 8N\theta_w^3 h_w^2 \beta_{xc} / (15I_{50})}{1 + h_w^2 L_w / (2I_{20})}, \quad (5)$$

откуда видно, что при определенных параметрах вигглеры могут как увеличивать, так и уменьшать (для этого, в частности, желательна малая горизонтальная β) результирующий эмиттанс источника СИ.

Помимо пятого и второго интеграла для модели поля (1) третий интеграл увеличивается на

$$I_{3w} = \frac{4}{3\pi} h_w^3 L_w \quad (6)$$

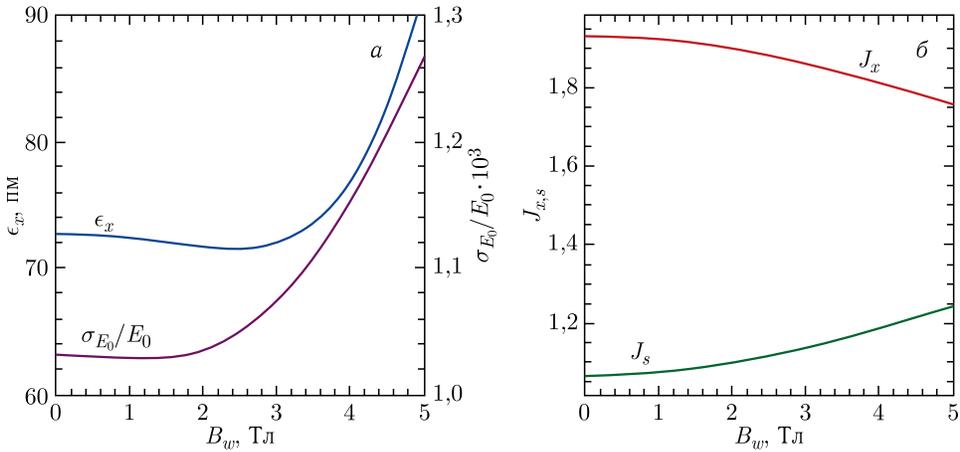


Рис. 2. Изменение безразмерных декрементов затухания (б), результирующего (с учетом изменения горизонтального декремента) горизонтального эмиттанса (рис. а, левая ось) и энергетического разброса (рис. а, правая ось) в зависимости от амплитуды поля вигглера

и вызывает неизбежное увеличение энергетического разброса, что показано на рис. 2, а.

Также на рис. 2, а показано типичное поведение функции r_ϵ (5) в зависимости от амплитуды поля вигглера SCW1-5 с параметрами из табл. 1 (искажение оптических функций вигглером не учитывается). С увеличением амплитуды поля результирующий эмиттанс вначале падает из-за дополнительного затухания, а затем растет из-за увеличения квантовой диффузии.

Изменение эмиттанса, вызванное вигглером, зависит от нескольких факторов. Вклад вигглера в радиационные интегралы и результирующий эмиттанс показаны на рис. 2. Минимальная величина эмиттанса 71 пм достигается при амплитуде поля вигглера 2,5 Тл, при 3,5 Тл эмиттанс становится равным исходному. Это может быть положительным фактором, так как условия эксперимента сохраняются на всех станциях.

И, наконец, рассмотрим влияние вигглера на нелинейную динамику пучка. Даже для однородного поля в горизонтальном направлении (бесконечно широкие полюсы) краевое поле полюсов на орбите пучка нелинейно, и для модели синусоидального поля может быть описано поправкой к гамильтониану линейного движения вида

$$\Delta H_2 = \frac{1}{12} \theta_w^2 k_w^4 y^4. \quad (7)$$

Оценить влияние вигглера на движение частиц можно, например, сравнив нелинейный сдвиг бетатронной частоты из-за поля вигглера

$$\Delta \nu_y(A_y) = C_{yy} A_y^2, \quad C_{yy} \approx \frac{1}{64\pi} L_w k_w^4 \theta_w^2 \beta_{yc} \quad (8)$$

с тем, который дают сильные секступольные линзы, компенсирующие натуральный хроматизм. Для SCW с параметрами из табл. 1 $C_{yy} \approx 280 \text{ м}^{-2}$, $\beta_{yc} \approx 5 \text{ м}$ и амплитуды $A_y = 2 \text{ мм}$ сдвиг частоты $\Delta \nu_y \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$. Между тем для этой же амплитуды

хроматические секступоли дают величину в 200 раз большую: $\Delta\nu_y \approx 0,24$, т. е. можно ожидать, что прямое нелинейное воздействие вигглера(-ров) на движение частиц будет несущественным.

3. КОРРЕКЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ ОПТИКИ КОЛЬЦА

Численное моделирование движения частицы в накопителе СКИФ с вставными устройствами проводилось программами MAD-X [11] и Elegant [12]. На рис. 3 показаны магнитные элементы половин суперпериодов накопителя СКИФ и прямолинейный промежуток со вставным устройством (insertion device — ID).

Для коррекции оптики, возмущенной вставным устройством, использовались следующие варианты:

- 1) изменение градиентов регулярных квадрупольных дублетов промежутка (пары QFA и QDA — далее дублет D);
- 2) постановка дополнительной квадрупольной линзы вблизи регулярного дублета (пары QFA, QDA, QS — далее триплет T);
- 3) постановка двух дополнительных квадрупольных линз вблизи регулярного дублета (пары QFA, QDA, QS, QA — далее квадруплет Q);
- 4) комбинация описанных выше методов с использованием квадрупольной коррекции, заложенной во все секступольные линзы накопителя (D + CG и T + CG).

Схема коррекции определяется на основе параметров вставного устройства. Для настройки бетатронных функций после влияния вставного устройства необходимы четыре независимые квадрупольные линзы. Квадруплетный вариант позволяет локализовать оптику внутри промежутка, но он самый сложный и требует дополнительных затрат. Поэтому мы рассматриваем и более простые варианты.

В качестве целевых функций оптимизации использовались сдвиг бетатронных частот и возмущение бетатронных функций за пределами промежутка установки вставного устройства с весовыми коэффициентами.

Мы рассматриваем разные варианты коррекции влияния отдельных вставных устройств на примере сверхпроводящего ондулятора SCU1-1 и сверхпроводящего вигглера SCW1-5 с параметрами из табл. 1. Используются способы компенсации: регулярный дублет, триплет, квадруплет и дублет с корректорами градиента. В табл. 2 показано остаточное возмущение оптики для разных методов коррекции. Самый простой метод коррекции для ондуляторов — регулярными дублетами — дает малое смещение

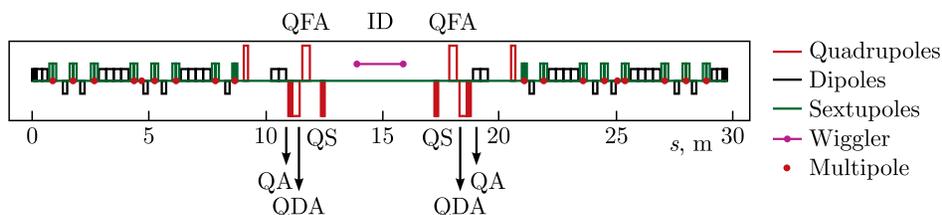


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Магнитные элементы прямолинейного промежутка и двух половин суперпериодов

Таблица 2. Остаточное возмущение оптики кольца и параметры пучка для различных методов коррекции влияния сверхпроводящих ондулятора и вигглера

Метод	$\Delta\nu_{x,y} \cdot 10^3$	$\Delta\beta_x/\beta_x, \%$	$\Delta\beta_y/\beta_y, \%$	$\Delta\eta_x, \text{мм}$	$\varepsilon_x, \text{пм}$	$\sigma_E/E \cdot 10^3$	$U_0, \text{МэВ}$	J_x	$\tau_x, \text{нс}$
SCU1-1									
w/o	0/3,1	0	2	0	71,5	1	0,55	1,9	9,1
D	-0,1/10	0,15	5	0	71,5	1	0,55	1,9	9,1
T	-0,2/0,3	4	2	0	71,5	1	0,55	1,9	9,1
Q	0	2,5	5,5	0	71,5	1	0,55	1,9	9,1
D + CG	0	3,2	2,6	0,4	71,6	1	0,55	1,9	9,1
SCW1-5									
w/o	0/17,9	0	15	0	87,2	1,2	0,63	1,78	8,4
D	-0,5/47	0,6	18	0	88,3	1,2	0,63	1,78	8,4
T	-14/4	35	11	0	95,5	1,2	0,63	1,78	8,4
Q	0	11	24	0	86,4	1,2	0,63	1,78	8,4
T + CG	0	31	10	-1	94,8	1,2	0,63	1,78	8,4

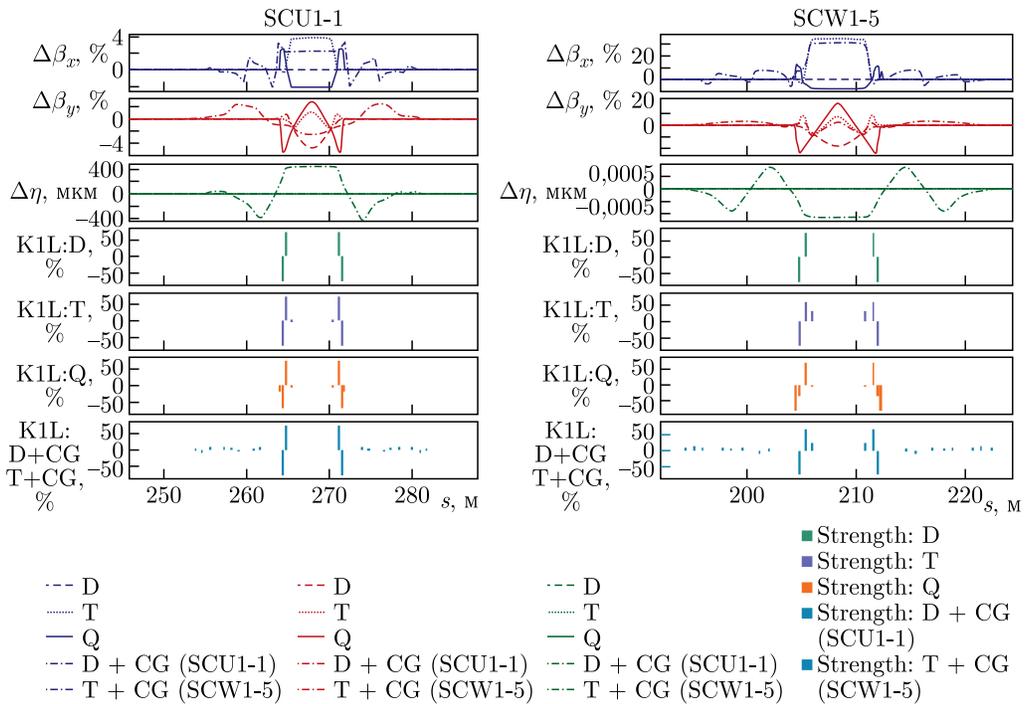


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Коррекция влияния ондулятора SCU1-1 (слева) и SCW1-5 (справа). Сверху вниз: относительное возмущение горизонтальной и вертикальной бетатронных функций к номиналу, искажение дисперсионной функции, изменение сил квадрупольных линз к максимальной проектной силе

бетатронной частоты и малые искажения. Такое слабое влияние объясняется малыми амплитудой поля и бета-функцией. В случае SCW1-5 сдвиг вертикальной бетатронной частоты при коррекции дублетами больше $\Delta\nu_y = 0,047$, а локальное искажение бета-функций достигает 30%. Результаты коррекции показаны на рис. 4 (SCU1-1 — слева, SCW1-5 — справа).

Отметим, что моделирование и в случае SCU1-1, и в случае SCW1-5 дает сдвиг частоты примерно в два раза больше, чем простая оценка предыдущего раздела (2), поскольку, в отличие от формулы, учитывает возмущение бетатронных функций как локально, в прямолинейном промежутке, так и вне его.

Использование для коррекции слабых квадрупольных обмоток на ярме секступолей в обоих случаях (обозначены на рис. 4 как D+CG) приводит к появлению в прямолинейном промежутке ненулевой горизонтальной дисперсионной функции, так как сами секступоли расположены в дисперсионной зоне. Однако величина этой остаточной дисперсии не превышает 1 мм (для SCW1-5) и не приводит к изменению параметров пучка.

Остаточное возмущение оптики кольца после коррекции показано в табл. 2. Здесь максимальное (по модулю) относительное изменение β -функций приведено в промежутке, где ставится устройство; за пределами промежутка такое изменение мало, кроме случая без применения коррекции (w/o).

Также в табл. 2 показано изменение радиационных параметров пучка при коррекции вигглера и ондулятора. Изменения, вызванные ондулятором, малы и не зависят от метода коррекции. Для вигглера изменение горизонтального эмиттанса зависит от метода коррекции, так как вигглер изменяет бетатронные функции, даже после коррекции, на участке установки устройства. Максимальный горизонтальный эмиттанс составляет 95 пм для триплетной коррекции и 86 пм для квадруплетной. Важным аспектом влияния вставных устройств на динамику пучка является возможное уменьшение динамической апертуры. Результаты соответствующего моделирования для рассмотренных выше методов коррекции SCU1-1 и SCW1-5 показаны на рис. 5.

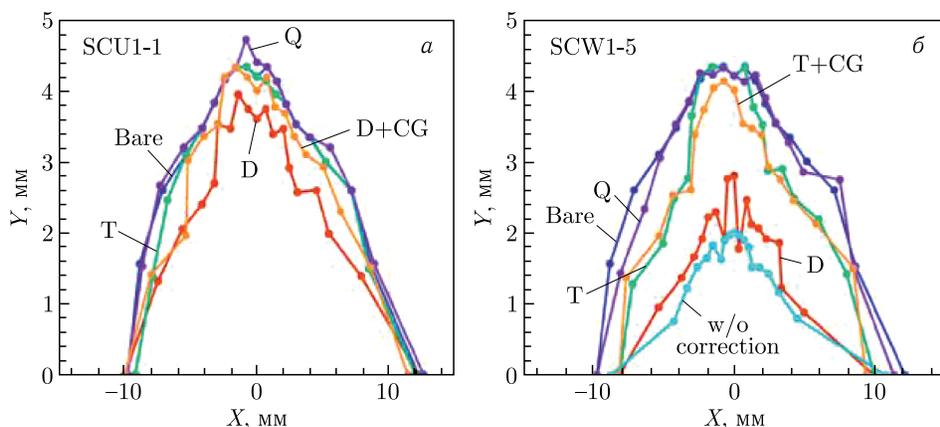


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Динамическая апертура в центре промежутка при коррекции влияния SCU1-1 (а) и SCW1-5 (б) разными методами

Если для SCU1-1 уменьшение динамической апертуры незначительно для всех способов коррекции, то для SCW1-5 результат зависит от выбранного метода. Наибольшая апертура (равная невозмущенной) наблюдается при коррекции квадруплетами линз, наименьшая — для дублетов. Динамическая апертура существенно падает по вертикали (с 4,5 до $\approx 2,2$ мм), что не является критичным для работы ускорителя.

Для моделирования влияния всех шести вставных устройств первой очереди устройства из табл.1 были расставлены в «свои» промежутки (указанные там же). Рис.6 показывает изменение оптических функций для разных вариантов коррекции, табл.3 — сдвиг бетатронных частот и максимальные остаточные изменения оптических функций на кольце; локальные изменения хорошо видны на рис. 6.

Таблица 3. Изменения значений бетатронных частот, оптических функций и радиационных параметров накопителя СКИФ для различных методов коррекции влияния сверхпроводящих вставных устройств

Метод	$\Delta\nu_{x,y} \cdot 10^3$	$\Delta\beta_x/\beta_x, \%$	$\Delta\beta_y/\beta_y, \%$	$\Delta\eta_x, \text{мм}$	$\varepsilon_x, \text{пм}$	$\sigma_E/E \cdot 10^3$	$U_0, \text{МэВ}$	J_x	$\tau_x, \text{мс}$
D	-1/121	0,05	0,2	0	79	1,2	0,8	1,64	7,5
D(U) + T(W)	-23/44	0,07	0,01	0	86	1,2	0,8	1,64	7,5
D + CG(U) - T + CG(W)	0	0	0	0,4	85	1,2	0,8	1,64	7,5
Q	0	0	0	0	78	1,17	0,8	1,64	7,5

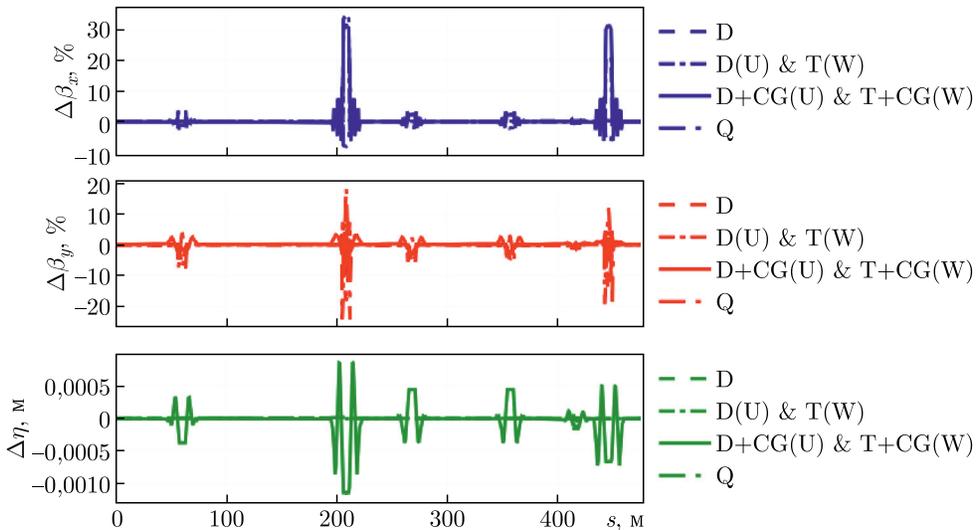


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Искажение оптических функций кольца накопителя после постановки всех сверхпроводящих устройств первой очереди и коррекции оптических свойств, проведенной различными способами

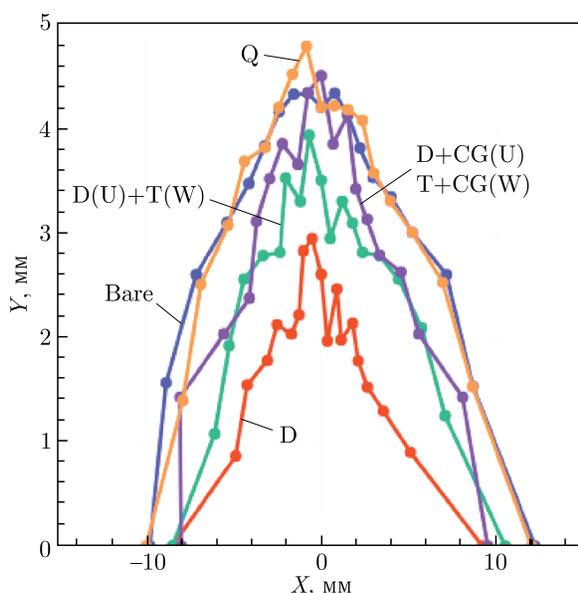


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Динамическая апертура накопителя СКИФ после постановки и коррекции шести сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов

Целевой функцией в данном моделировании было уменьшение искажения оптических функций за пределами промежутка со вставным устройством. Это хорошо получилось даже для «простой» дублетной коррекции, однако ценой серьезного сдвига вертикальной бетатронной частоты.

Поперечная динамическая апертура для всех шести сверхпроводящих вставных устройств показана на рис. 7. Лучший результат, равный апертуре невозмущенной структуры, удастся получить, используя квадруплетную коррекцию вставных устройств.

Также в табл. 3 представлены радиационные параметры накопителя. Интересно отметить, что минимальный горизонтальный эмиттанс после постановки и коррекции вставных устройств первой очереди получается как для дублетного варианта коррекции (значительно ухудшающего бетатронную динамическую апертуру), так и для квадруплетного. В зависимости от настройки оптики после постановки первых генераторов излучения — вигглеров и ондуляторов — мы вправе ожидать результирующий эмиттанс кольца $\varepsilon_{xw} \approx 80\text{--}90$ пм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены вопросы, связанные с влиянием вигглеров и ондуляторов первой очереди на динамику пучка источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП «СКИФ». Исследованы различные способы компенсации такого влияния для уменьшения искажения магнитооптических характеристик накопителя, увеличения динамической апертуры и оптимизации радиационных параметров. По результатам исследования принято, что для коррекции ондуляторов, влияющих относительно сла-

бо, достаточно регулярных дублетов квадрупольных линз (с индивидуальными источниками питания), установленных в ондуляторных промежутках, и, при необходимости, небольших градиентных корректоров, заложенных во все секступоли накопителя. Для компенсации влияния мощных сверхпроводящих вигглеров необходимо предусмотреть установку двух квадрупольных линз дополнительно к существующим дублетам, осуществляя, таким образом, квадруплетную коррекцию, которая позволяет полностью локализовать возмущение оптических функций на промежутке вигглера, получить минимальный результирующий эмиттанс и динамическую апертуру, равную исходной.

Благодарности. Авторы благодарны В. А. Шкарубе за уточнение проектных параметров сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов ЦКП «СКИФ». Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0041), а также при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области Российской Федерации (грант РФФ 22-12-20025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухтияров А. В., Бухтияров В. И., Журавлев А. Н., Золотарев К. В., Zubavichus Я. В., Левичев Е. Б., Мезенцев Н. А., Николенко А. Д., Пиминов П. А., Чуркин И. Н. Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») // Кристаллография. 2022. Т. 67, № 5. С. 742–765.
2. Baranov G., Bogomyagkov A., Levichev E. et al. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24. P. 120704.
3. Riemann B., Streun A. Low Emittance Lattice Design from First Principles: Reverse Bending and Longitudinal Gradient Bends // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. P. 021601.
4. Винокуров Н. А., Левичев Е. Б. Ондуляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений // УФН. 2015. Т. 185, № 9. С. 917–939.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.
6. Undulators, Wigglers and Their Application / Eds.: P. Elleaume, H. Onuki. London: Taylor & Francis, 2003.
7. Tavares P. F. et al. The MAX IV Storage Ring Project // J. Synchrotron Rad. 2014. V. 21. P. 862–877.
8. Шкаруба В. А., Брагин А. В., Волков А. А., Ерохин А. И., Зорин А. В., Казанцев Ф. П., Канолик П. В., Мезенцев Н. А., Сафронов А. Н., Седов А. А., Тарасенко О. А., Хрущев С. В., Цуканов В. М. Сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы для генерации синхротронного излучения на накопителе «СКИФ» // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 999–1005.
9. Гуров Д. С., Золотарев К. В., Зуев В. В., Уткин А. В., Ческидов В. Г. Эллиптический электромагнитный ондулятор UE212M для станции 1-6 «Электронная структура» источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» // Технол. инфраструктура Сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ». 2022. Т. 3. С. 42–52.
10. Helm R. H. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. P. 900.
11. Deniau L., Grote H., Roy G., Schmidt F. Methodical Accelerator Design. A Full Manual MAD-X. CERN. Geneva, 2015.
12. Borland M. Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation. Advanced Photon Source LS-287. 2000.

Получено 15 сентября 2023 г.