

12 Анализ стабильности орбиты пучка источника синхротронного излучения ЦКП „СКИФ“

© Г.Н. Баранов,^{1,2,3} П.А. Дергач,^{4,5} К.Ю. Карюкина,^{1,2} В.А. Павлюченко,² Е.Б. Левичев^{1,2,3}

¹ Центр коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“
Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,
630559 Кольцово, Россия

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет,
630073 Новосибирск, Россия

⁴ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

⁵ Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: K.Yu.Karyukina@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 21 июня 2023 г.

В окончательной редакции 4 сентября 2023 г.

Принято к публикации 4 сентября 2023 г.

Приведены результаты исследования сейсмической обстановки в районе строительной площадки Центра коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“ (ЦКП „СКИФ“) — источника синхротронного излучения четвертого поколения, сооружаемого в настоящее время в Новосибирске, определены основные источники сейсмического фона и на основе полученных данных оценены параметры системы обратной связи, позволяющей динамически корректировать положение пучка электронов в точках излучения, купируя негативное влияние сейсмических воздействий на эффективность работы источника.

Ключевые слова: источник синхротронного излучения, эмиттанс, стабильность магнитных элементов, яркость синхротронного излучения, сейсмические колебания.

DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56498.153-23

Введение

Современные источники синхротронного излучения (СИ) — это ускорители (накопители) электронов ультрарелятивистских энергий (до нескольких гигаэлектронвольт). Пучок ускоренных частиц, двигаясь в поперечном магнитном поле, излучает фотоны по касательной к траектории движения. Это излучение, обладая рядом уникальных свойств, находит широкое применение в различных областях науки и техники.

Одним из основных параметров источника СИ, характеризующим его „качество“, является яркость, определяемая как поток фотонов, нормированный на фазовый объем (эмиттанс) источника. Для повышения яркости излучения эмиттанс накопителя оптимизируют, „сжимая“ пучок частиц мощными фокусирующими (квадрупольными) линзами. Магнитное поле квадрупольной линзы равно нулю на оси и линейно растет при увеличении поперечной координаты частицы. Если квадрупольные линзы по каким-то причинам сдвигаются в поперечном направлении, то на орбите появляются дипольные поля, отклоняющие пучок как целое и приводящие к тому, что в точке излучения у пучка электронов (а, следовательно, и у пучка СИ) появляется смещение как по углу, так и по координате. Если период таких смещений (меха-

нических колебаний) квадрупольных магнитов меньше, чем характерное время экспозиции, то для экспериментатора „дрожание“ пучка СИ на образце или оптических элементах приведет к увеличению эффективного фазового объема источника и падению яркости. Это же имеет место для любого другого магнита с поперечно неоднородным полем.

В приближении Гаусса пик яркости излучения из ондулятора определяется как:

$$Br \propto \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_u^2} \sqrt{\sigma_{x'}^2 + \sigma_{u'}^2} \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_u^2} \sqrt{\sigma_{y'}^2 + \sigma_{u'}^2}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{x,y}$ и $\sigma_{x',y'}$ — электронный размер пучка и расходимость в горизонтальной и вертикальной плоскости в месте излучения, σ_u и $\sigma_{u'}$ — размер и расходимость излучения пучка. Характерные поперечные размеры электронного пучка в точке излучения достигают нескольких микрон, а допустимое смещение орбиты составляет 5–10% от этих значений. Горизонтальный эмиттанс электронного пучка будет составлять $73 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, а вертикальный при 10% связи — $7.3 \text{ pm} \cdot \text{rad}$. Среднеквадратичный размер и расходимость источника излучения для одиночного электрона в ондуляторе зависят от длины волны излучения λ и определяются как $\sigma_u = \sqrt{2\lambda L/4\pi}$,

$\sigma_{u'} = \sqrt{\lambda/2L}$, где L — длина ондулятора. Таким образом, для одиночного электрона в ондуляторе на длине волны 10 \AA фазовый объем излучения составляет $80 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, на длине волны 1 \AA — уже $8 \text{ pm} \cdot \text{rad}$, что сопоставимо с вертикальным эмиттансом электронного пучка.

Поскольку смещение квадрупольных линз трансформируется в смещение пучка с усилением в несколько десятков раз (из-за сильнофокусирующей оптики источника СИ, требуемой для минимизации эмиттанса), допуск на амплитуду отклонения магнитов кольца в области низких частот составляет всего десятки нанометров, и при проектировании современных источников СИ вопросам механической стабильности магнитных элементов необходимо уделять самое серьезное внимание.

Источники микровибраций магнитных элементов накопительного кольца разнообразны. Это может быть геологическая сейсмическая активность, микросейсмизм как естественного, так и техногенного характера, сейсмический фон от промышленных предприятий (особенно горнодобывающих), наличие транспортных магистралей (железных дорог, трамвайных путей, автострад) в непосредственной близости от источника СИ и т.д. Сейсмический шум может создавать инженерная инфраструктура установки — трансформаторы, насосы, грузоподъемные механизмы и т.п. Наконец, источники микровибраций могут размещаться непосредственно на самих магнитах — например, это может быть турбулентное течение жидкости в трубках охлаждения токовых обмоток, создающих магнитное поле.

Для обеспечения жестких требований пространственной стабильности магнитных элементов принимаются различные меры, включая выбор площадки для строительства в зоне пониженной сейсмической активности, вдали от промышленных районов и крупных транспортных систем (что не всегда возможно), устройство сложных сейсмогасящих фундаментов. Магнитные элементы размещают и жестко закрепляют группами на специальных фермах-подставках (*girder*), подбирая элементы таким образом, чтобы их когерентное движение влияло на смещение пучка меньше, чем независимое. Механические конструкции (магниты + подставки) оптимизируются так, чтобы их низшие резонансные моды колебаний оказывались по частоте выше характерных источников возмущения, при этом на высоких частотах механические частоты не должны совпадать с частотами возмущения. Наконец, создается активная система обратной связи, состоящая из датчиков положения пучка (электронного или фотонного) и слабых магнитов-корректоров с переменным полем, размещенных таким образом, чтобы максимально эффективно влиять на пучок в точках излучения.

Важной задачей на этапе проектирования источника СИ является изучение сейсмического фона на площадке строительства, определение и оценка опасности различных его источников, а также, исходя из полученных результатов, предварительное проектирование системы

коррекции колебаний пучка. Эти вопросы и обсуждаются в настоящей работе.

1. Источник синхротронного излучения „СКИФ“

Центр коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“ (ЦКП „СКИФ“) — источник СИ четвертого поколения — представляет собой сложный ускорительный комплекс, состоящий из линейного ускорителя с энергией пучка 200 MeV , бустерного синхротрона (максимальная энергия 3 GeV), накопительного кольца (3 GeV) [1] и шести экспериментальных станций первой очереди (рис. 1).

Базовые параметры установок приведены в табл. 1, и именно они используются ниже для различных оценок.

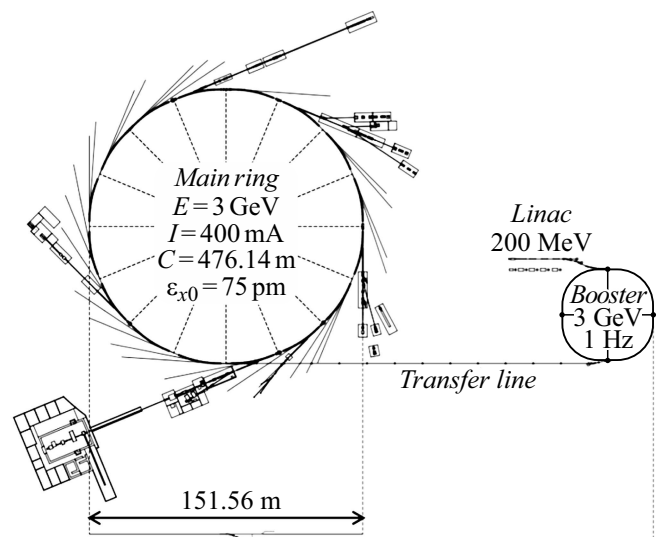


Рис. 1. Схема размещения основных установок ЦКП „СКИФ“. Показаны линейный ускоритель, бустерный синхротрон, основной накопитель электронов и несколько экспериментальных станций. E — энергия пучка, I — ток, C — периметр кольца, ϵ_{x0} — горизонтальный натуральный эмиттанс.

Таблица 1. Основные параметры бустера и накопителя ЦКП „СКИФ“ на энергии 3 GeV

Параметр	Бустер	Накопитель
Энергия, GeV	3	3
Периметр, m	158.71	476.14
Периодичность	4	16
Горизонтальный эмиттанс, $\text{pm} \cdot \text{rad}$	37 400	73
Энергетический разброс, %	$8.3 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Бетатронные частоты (x/y)	9.65/3.41	50.81/18.84
Коэффициент уплотнения орбит	$8.8 \cdot 10^{-3}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$

Поскольку эмиттанс пучка в накопителе существенно меньше, чем в бустере, очевидно, что требования на механическую стабильность для оборудования накопителя значительно жестче, чем для синхротрона–бустера.

Накопитель СКИФ состоит из шестнадцати идентичных ахроматических суперпериодов с магнитной структурой типа 7МВА (Multiple Bend Achromat) [2], каждый из которых завершается прямолинейным промежутком длиной 6 м. Четырнадцать промежутков предназначены для постановки излучающих вставных устройств (многополюсных магнитных вигглеров и ондуляторов), а два оставшихся — для размещения оборудования инжекции и ускоряющих высокочастотных резонаторов.

Для получения малого эмиттанса приходится использовать слабые поворотные магниты с малым углом поворота θ (поскольку $\epsilon_x \propto \theta^3$), которые излучают в спектральной области мягкого рентгена и вакуумного ультрафиолета. Чтобы удовлетворить потребности пользователей в жестком рентгеновском диапазоне, центральный магнит каждого суперпериода разделен сильнополюевой вставкой — диполем на мощных постоянных магнитах NeFeB, позволяющих получить на орбите поле 2.1 Т. Большинство дипольных магнитов, формирующих замкнутую орбиту пучка, содержат поперечный градиент поля и участвуют в фокусировке, что позволяет сделать структуру более компактной [1].

Оптические функции одного суперпериода показаны на рис. 2. Среднеквадратичные размеры и расходимости электронного пучка вдоль суперпериода, рассчитанные согласно

$$\sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y}, \quad \sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x + \eta_x^2 \delta^2}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{x,y}$ — эмиттанс пучка, $\delta = \Delta E/E_0$ — относительный энергетический разброс в пучке, η_x — дисперсионная, а $\beta_{x,y}$ — бетатронные функции, показаны для одного суперпериода на рис. 3.

Значения среднеквадратичного размера пучка и среднеквадратичной угловой расходимости в точках вывода

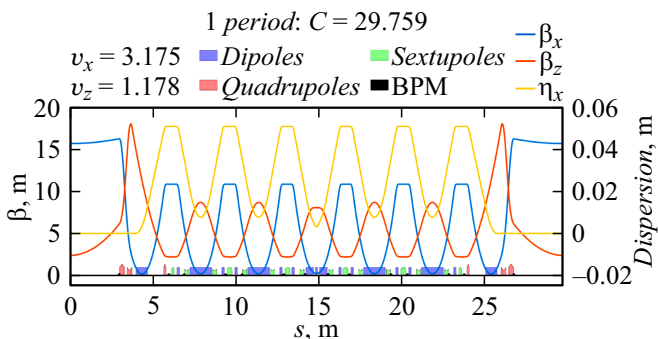


Рис. 2. Оптические функции суперпериода накопителя. ν_x, ν_z — горизонтальная и вертикальная бетатронные частоты (безразмерные величины), C — длина суперпериода, [m], s — продольная координата вдоль суперпериода, β_x, β_z — горизонтальная и вертикальная бета-функции, [m], η_x — горизонтальная дисперсионная функция, BPM — Beam Position Monitor.

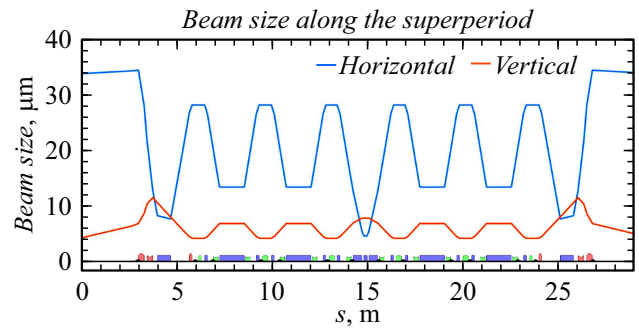


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичных размеров пучка вдоль суперпериода СКИФ. s — продольная координата вдоль суперпериода.

Таблица 2. Пространственные и угловые размеры пучка в точках вывода излучения

Место вывода излучения	$\sigma_x, \mu\text{m}$	$\sigma_{x'}, \mu\text{rad}$	$\sigma_y, \mu\text{m}$	$\sigma_{y'}, \mu\text{rad}$
Вставное устройство	33.7	2.2	4.2	1.7
Диполи	5.7	22.8	7.7	1

излучения из прямолинейного промежутка и сильнополюевого магнита приведены в табл. 2.

Минимальный (вертикальный) среднеквадратичный размер пучка (1σ) в центре прямолинейного промежутка — около $4 \mu\text{m}$. Принятый допуск на точность стабилизации положения пучка электронов — это $< 10\%$ от его размера в точке излучения [3] (реально достигается $\sim 3-5\%$), и это означает, что система обратной связи должна обеспечить стабильность пучка в этом месте с точностью лучше $0.4 \mu\text{m}$ для „неконтролируемых“ источников сейсмических вибраций поверхности строительной площадки ЦКП „СКИФ“. Подразумевается, что шум „контролируемых“ источников внутри здания СКИФ (насосов, трансформаторов, систем вентиляции и кондиционирования, транспортных устройств и т.п.) может быть минимизирован применением виброподавляющих решений в конструкции и крепеже.

2. Изучение сейсмических колебаний на площадке ЦКП „СКИФ“

Анализ влияния вибраций грунта является неотъемлемой частью проектирования современных источников синхротронного излучения [4–7]. Подробный анализ сейсмической обстановки на строительной площадке ЦКП „СКИФ“ был проведен Алтае-Саянским филиалом ФИЦ „Единая геофизическая служба Российской академии наук“ и Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Измерения проводились локальной сетью трехкомпонентных сейсмических станций (рис. 4) в период с 01.11.2021 по 11.01.2022 г. Пять станций размещались

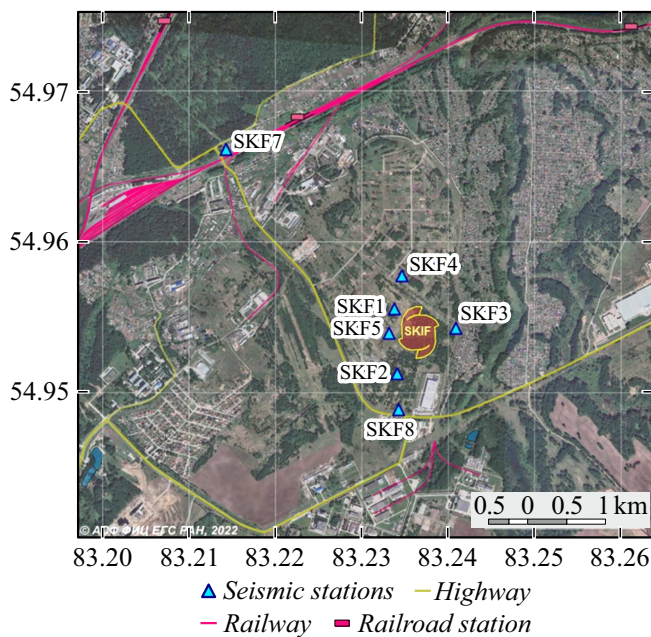


Рис. 4. Локальная сеть сейсмических станций ЦКП „СКИФ“ (синие треугольники (в онлайн версии)).

непосредственно на площадке, а две — вблизи железной и автодороги, что позволяло исследовать затухание сейсмической волны. Для независимой проверки была проведена дополнительная серия измерений меньшим числом станций (три). Результаты обоих измерений хорошо совпадают.

Кратко перечислим полученные результаты [8]:

- За почти два месяца наблюдений в радиусе 500 km от ЦКП „СКИФ“ зарегистрировано 2140 сейсмических событий. Из них 648 классифицированы как землетрясения (включая техногенные), 1456 — как промышленные взрывы. Только 24 из этих событий имеют локальную магнитуду $M_L \geq 3$. Слабые и далекие землетрясения имеют частотный спектр, не превышающий 4–5 Hz и малую амплитуду, сильные — простираются по спектру до 20–30 Hz и имеют большую амплитуду колебаний, но крайне редки. Промышленные взрывы в близлежащих (~ 50 km) карьерах хоть и имеют широкий спектр, но они очень короткие по длительности и, по всей вероятности, не представляют опасности для эксперимента.

- Сейсмические воздействия от железнодорожного транспорта имеют вид набора кратных гармоник, охватывающих широкий диапазон частот, начиная с ~ 3–6 Hz и выше. На площадку ЦКП „СКИФ“ заметное воздействие (до пиковых смещений грунта $PGD = 3 \mu m$) оказывают преимущественно грузовые поезда.

- Сейсмические воздействия от движущегося автомобильного транспорта фиксируются в виде непрерывного спектра в диапазоне частот от 4 до 30 Hz. Они характеризуются длительностью порядка 2 min. Данные воздействия вследствие быстрого затухания колебаний

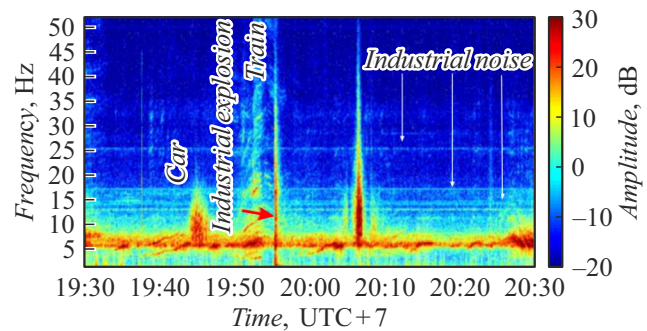


Рис. 5. Спектрограмма различных сейсмических событий, наблюдавшихся на площадке ЦКП „СКИФ“. Амплитуда указана относительно $0.1 \mu m/s$.

заметны лишь на ближайшей к автомобильной дороге станции.

- Промышленные шумы оборудования соседних предприятий выражены двумя видами монохроматических колебаний: во-первых, с устойчивой и, во-вторых, с плавно изменяющейся частотой. Режим работы источников варьирует от непрерывного до эпизодического на разных частотах. Характерные частоты длительных сигналов (на протяжении суток) — 10, 13, 18 и 25 Hz. Периодически возникают сигналы на разных частотах от 30 до 50 Hz. Они редки и по длительности не превышают 2–3 h. Большинство из монохроматических сигналов связано с близрасположенным заводом, и они значительно затухают с расстоянием до него — приблизительно на один порядок за 500 m.

Для иллюстрации спектрограмма, содержащая различные сигналы, записанные одной из сейсмостанций ЦКП „СКИФ“, показана на рис. 5.

В табл. 3 указаны пиковые значения для скоростей (PGV), ускорений (PGA) и смещений (PGD) грунта на площадке СКИФ для различных событий, а также характерные спектральные частоты таких событий (f), их длительность (t) и приблизительное число в сутки (N). Колонка RMS показывает среднеквадратичные смещения грунта (для оценки коэффициент передачи фундамента принят равным единице).

Видно, что основные значимые сейсмические события имеют характерные частоты не более 50 Hz, землетрясения и промышленные взрывы редки по сравнению транспортом, ночью общий сейсмический шум существенно снижается, а в промышленном сегменте вокруг строительной площадки не наблюдается никаких крупных предприятий тяжелой промышленности.

3. Искажение замкнутой орбиты пучка из-за смещения магнитных элементов накопителя СКИФ

Вертикальная компонента магнитного поля на орбите $\Delta B_y(s)$ приводит к возмущению горизонтальной замкну-

Таблица 3. Классификация сейсмически значимых событий на площадке ЦКП „СКИФ“

События	Количество в сутки	f , Hz	t , s	PGA, $\mu\text{m/s}^2$	PGV, $\mu\text{m/s}$	PGD, μm	RMS, nm
Землетрясения	0.3	5–20	15–200	150–1300	5–25	3–9	500
Промышленные взрывы	1.6	5–20	15–25	250–1700	5–25	1–3	500
Ж/д транспорт	100	3–8	200	100–2500	3–60	1–3	100–300
Автотранспорт	2500	5–30	10–30	< 2500	< 40	≤ 1	60–200
Промышленный сегмент	–	20–50	–	–	–	–	–
Шум (день/ночь)	–	2–100	–	1000/100	50/5	0.15/0.02	35/5

той орбиты пучка, которое описывается неоднородным уравнением Хилла

$$x'' + K_x(s)x = \frac{\Delta B_y(s)}{B\rho}, \tag{3}$$

где $K_x(s)$ — фокусирующий коэффициент, а $B\rho$ — магнитная жесткость структуры. Решением уравнения является

$$x_{co} = \int_s^{s+C} G_x(s, s') \frac{\Delta B_y(s')}{B\rho} ds', \tag{4}$$

где интеграл берется по периметру ускорителя от функции Грина уравнения (3):

$$G_x(s, s') = \frac{\sqrt{\beta_x(s)\beta_x(s')}}{2 \sin \pi\nu_x} \cos(\pi\nu_x - |\psi_x(s) - \psi_x(s')|), \tag{5}$$

где $\beta_x(s)$, $\psi_x(s)$ и $\nu_x(s)$ — бетатронные амплитудная и фазовая функции, и бетатронная частота соответственно. Для вертикального движения формулы аналогичны, и мы их не приводим.

Величина искажения орбиты зависит от различных факторов: типа магнита, его силы, значения бетатронной функции в месте размещения и т.д., в том числе от характера смещения магнитов — независимо или коррелированно группами. Очевидно, что смещение накопительного кольца как целого не приводит к искажению орбиты, и одновременное смещение стоящих рядом фокусирующих и дефокусирующих линз приводит к меньшим искажениям орбиты, чем индивидуальное. Поэтому магнитные элементы в источниках СИ стремятся разместить на длинных (несколько метров) жестких фермах–подставках („балках“), которые приводят к коррелированному сдвигу закрепленных на них магнитов (рис. 6).

Принимая характерную скорость распространения сейсмической волны в бетонном основании накопителя $v \approx 3000$ m/s, легко получить, что частотам около тысячи герц соответствуют независимые колебания магнитов, сотням герц — когерентные смещения магнитов на длине в несколько метров (магниты, закрепленные

на балке), десяткам герц — смещение суперпериода как целого.

Чтобы оценить влияние поперечного смещения Δx отдельных типов магнитных элементов на величину искажения замкнутой орбиты x_{co} , вводится статистический коэффициент передачи M_x (и аналогично для вертикальной координаты) [10]:

$$\langle x_{co} \rangle = M_x \langle \Delta x \rangle, \tag{6}$$

где угловые скобки обозначают среднеквадратичное значение. Коэффициент передачи разный для разных типов магнитных элементов. Например, для случайного смещения квадрупольных линз, для которых

$$\Delta B_y = \Delta x \frac{dB_y}{dx}, \tag{7}$$

можно получить оценку

$$M_x \approx \frac{\sqrt{N_q}}{2\sqrt{2} |\sin(\pi\nu_x)|} \frac{1}{B\rho} \frac{dB_y}{dx} \bar{\beta}_x \bar{l}, \tag{8}$$

где N_q — число квадрупольных линз, а черта сверху обозначает среднее значение, \bar{l} — среднее значение длины элементов. Если значения градиента квадрупольных линз и бетатронной функции большие, то коэффициент передачи может быть значительно больше единицы, т.е. малые смещения квадрупольных линз будут приводить к существенным искажениям замкнутой орбиты.

Мы рассчитали коэффициент передачи для разных групп магнитных элементов СКИФ, задавая случайным образом смещение магнитов и моделируя искажение замкнутой орбиты. Поскольку речь идет о смещениях, вызванных сейсмическими колебаниями, за среднеквадратичную величину мы приняли 100 nm, соответствующих прохождению поезда. Оценка чувствительности оптической структуры проводилась программами Accelerator Toolbox [11] и MADX [12] по следующему сценарию:

- Магнитные элементы (или их последовательность) смещаются по горизонтали или вертикали на случайную величину, распределенную по нормальному закону, заданному стандартным отклонением $\sigma_{x,y} = \langle \Delta x, y \rangle$. Распределение „обрезается“ на уровне $\pm 3\sigma$ во избежание нереально больших значений.



Рис. 6. Магнитные сборки на балках для накопителя (слева) и для бустерного синхротрона СКИФ [9].

Таблица 4. Коэффициенты передачи для диполей, квадрупольей и секступольей при среднеквадратичном смещении магнита 100 nm

Величина	M_{dip}	M_{quad}	M_{sext}	M_{Σ}
x	12	113	$4.2 \cdot 10^{-4}$	113
y	28	45	$2.2 \cdot 10^{-4}$	53

- В центре каждого прямолинейного промежутка (в месте установки вставного устройства) измеряется отклонение замкнутой орбиты.

- После набора статистики порядка 1000 выборок находилось среднеквадратичное отклонение орбиты в каждой точке наблюдения, а затем проводилось усреднение по их количеству, и получалась величина $\langle x, y_{co} \rangle$.

- Коэффициент передачи находился как $M_x = \langle x_{co} \rangle / \sigma_x$ (и, аналогично, по вертикали) и представлен в табл. 4.

Для столь малых смещений и с учетом квадратичной зависимости дипольного поля секступольных линз от смещения видно, что искажение орбиты от секступольей пренебрежимо мало, и далее не учитывается. Максимальный же эффект вносят, как и ожидалось, сильные квадрупольные линзы.

Другим важным вопросом является зависимость искажения замкнутой орбиты от длины волны сейсмических колебаний, или, другими словами, от того, смещаются

Таблица 5. Среднеквадратичные отклонения орбиты по результатам моделирования

Величина	Спецификация	Вариант смещения		
		Независимое	Балка	Суперпериод
$x, \mu m$	3.4	11.3	10.3	0.235
$x', \mu rad$	0.22	0.7	0.59	0.016
$y, \mu m$	0.4	5.5	1.74	0.288
$y', \mu rad$	0.17	2.3	0.74	0.127

магнитные элементы индивидуально или когерентно. Были рассмотрены три варианта: независимое смещение диполей и квадрупольей друг относительно друга (табл. 5), магнитные элементы, стоящие на одной балке, смещаются когерентно, а балка к балке смещается независимо (табл. 5), и смещение суперпериода, как целого: все магнитные элементы в суперпериоде двигаются когерентно, а смещение суперпериода относительно суперпериода независимо.

Во всех трех случаях магниты (или их последовательность) смещались случайным образом, как это описано выше, со среднеквадратичным отклонением $\sigma_{x,y} = 100 \text{ nm}$. Колонка, обозначенная „Спецификация“, показывает спецификации, равные 10% от размеров

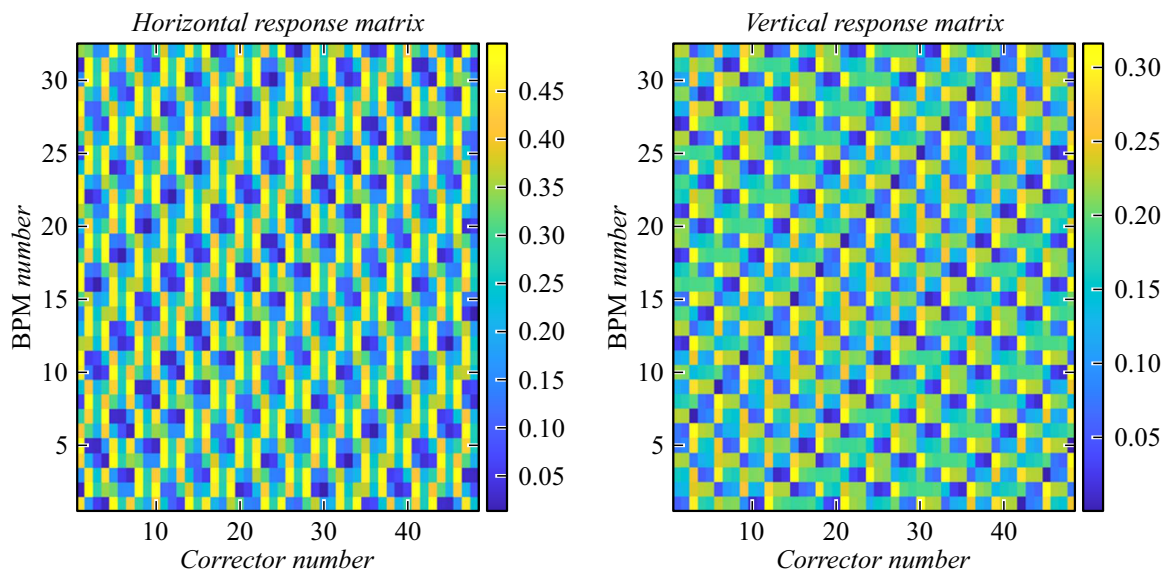


Рис. 7. Матрицы отклика. BPM — beam position monitor.

пучка (пространственных и угловых) в центре прямолинейного промежутка, приведенных в табл. 2.

Из табл. 5 видно, что, хотя размещение магнитов на балках существенно (в три раза) уменьшает угловое отклонение луча СИ в точке вывода по сравнению с независимым смещением магнитов, результаты все-таки не удовлетворяют требованиям пользователей. Смещение же суперпериода, хотя и соответствуют спецификациям, но технически нереализуемы. Для улучшения результатов необходимо использовать систему обратной связи, состоящую из датчиков положения пучка (электронного или синхротронного) и набора корректоров с полосой пропускания до 1000 Hz. Такие системы являются общепринятыми для современных источников СИ [13–17].

4. Оценка параметров корректоров системы обратной связи

На основе полученных выше результатов сделаем предварительную оценку параметров магнитных корректоров, необходимых для управления орбитой пучка в точке излучения (центр прямолинейного промежутка) в диапазоне, необходимом для того, чтобы результаты, приведенные в табл. 5, соответствовали требованиям пользователей. Для такой оценки будем предполагать, что полоса пропускания системы обратной связи бесконечна (т.е. сейчас мы рассматриваем статическую картину исправления искажения замкнутой орбиты).

В накопителе СКИФ имеется 320 дипольных магнитов для коррекции замкнутой орбиты. Подавляющая их часть совмещена с секступольными линзами, на полюсах которых размещаются дополнительные токовые обмотки, создающие вертикальное или горизонтальное магнитное поле. С учетом алюминиевой вакуумной камеры, на которой размещаются секступольные линзы,

частотный диапазон таких корректоров не превышает нескольких герц. Между тем, согласно табл. 3, стабилизация орбиты из-за микросейсмических шумов требует эффективной работы до нескольких сотен герц. Поэтому предполагается создать дополнительную широкополосную систему динамической коррекции положения пучка в точке вывода СИ из ондуляторов (в центрах прямолинейных промежутков), состоящую из „быстрых“ магнитных корректоров, размещенных на тонкостенной (толщина стенки 0.5 mm) вакуумной трубе из нержавеющей стали. Из-за очень плотной упаковки элементов накопителя СКИФ, мы размещаем три быстрых корректора в каждом суперпериоде. Рис. 7 показывает матрицы отклика, где по горизонтальной оси отложены 48 корректоров, а по вертикали — датчики положения пучка, ближайшие к центру промежутка (по два датчика, слева и справа от центра каждого из 16-ти промежутков). Цвет пикселя показывает степень эффективности влияния корректора на орбиту пучка на соответствующем датчике положения в соответствии с (2) и (3): темный означает, что нужен сильный корректор, чтобы изменить орбиту, светлый — что достаточно слабого корректора.

Видно, что для каждого датчика положения пучка имеется достаточное число эффективных корректоров.

Коррекция замкнутой орбиты пучка электронов проводилась с помощью сингулярного разложения (Singular Value Decomposition, SVD). В коррекции участвовало 48 магнитных корректоров (3 корректора \times 16 суперпериодов), каждый из которых предназначен для горизонтальной и вертикальной коррекции орбиты, и 32 датчика положения пучка, расположенные вблизи вставных устройств. В качестве возмущения был взят случай независимого смещения магнитов со среднеквадратичным отклонением, равным 100 nm.

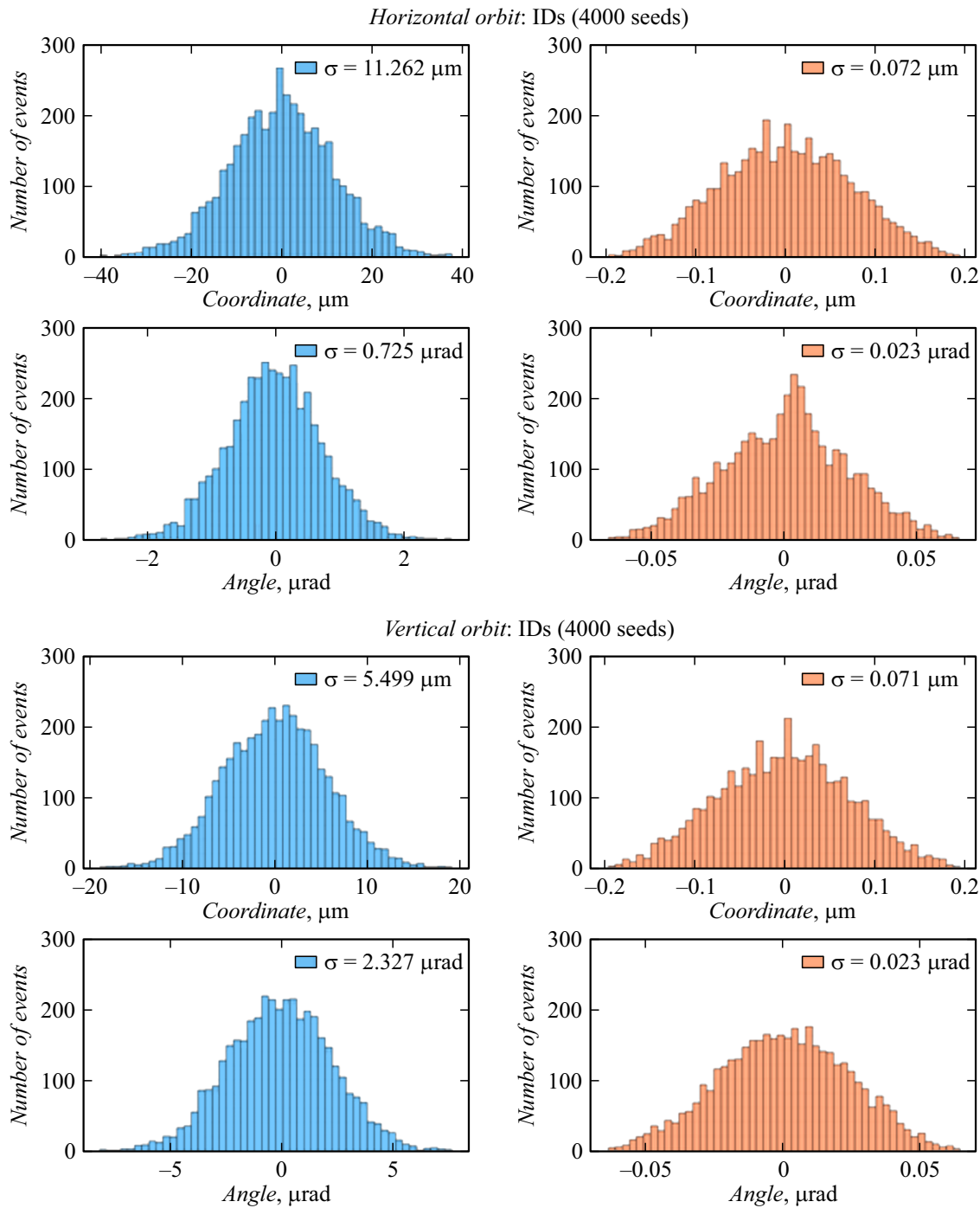


Рис. 8. Результаты моделирования искажения орбиты до коррекции (левый ряд) и после коррекции (4000 событий).

На рис. 8 показаны гистограммы распределения координат и углов (по горизонтали и вертикали) в центре прямолинейных промежутков до коррекции (левый ряд) и после коррекции (правый ряд) по 4000 испытаний.

Среднеквадратичные значения сведены в табл. 6, из которой видно, что предложенной системы быстрой обратной связи достаточно, чтобы восстановить смещение орбиты в точках излучения до требуемого. Максимальные интегральные значения корректоров для этой серии

испытаний не превышают $2\text{ G} \times 10\text{ cm}$ по горизонтали и $1.5\text{ G} \times 10\text{ cm}$ по вертикали.

С учетом неизвестных сейчас источников сейсмического шума техногенного характера, таких, как насосы, трансформаторы, преобразователи, транспортное и погрузочное оборудование, станки и т.д., которые могут появиться на территории ЦКП „СКИФ“ после начала эксплуатации, мы приняли максимальное поперечное поле в корректоре 10 G при эффективной длине 10 cm .

Таблица 6. Среднеквадратичные отклонения орбиты до и после коррекции

Величина	Спецификация	Независимое отклонение	
		До коррекции	После коррекции
$x, \mu\text{m}$	3.37	11.3	0.07
$x', \mu\text{rad}$	0.42	0.7	0.02
$y, \mu\text{m}$	0.22	5.5	0.07
$y', \mu\text{rad}$	0.17	2.3	0.02

Примечание. Обозначения колонок те же, что в табл. 5.

Таблица 7. Требования на быстрый корректор „СКИФ“

Число корректоров	48
Максимальное поле	± 10 G
Максимальный ток в обмотке	2.8 A
Эффективная длина	10 cm
Габаритная длина с обмотками	12 cm
Максимальная частота обработки	1000 Hz

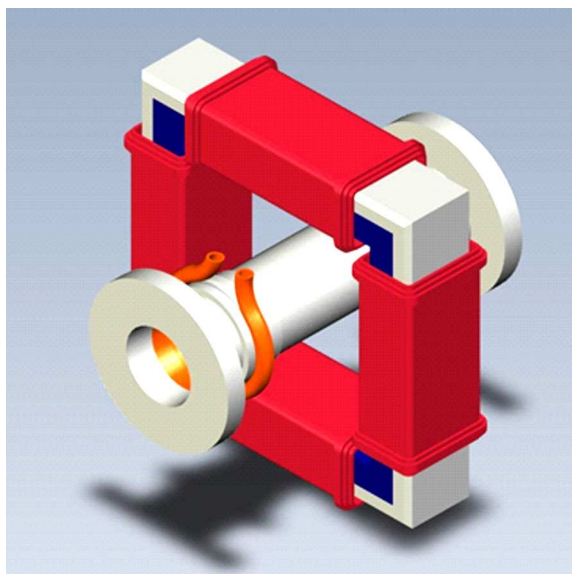
**Рис. 9.** Трехмерная модель быстрого двухкоординатного корректора с вакуумной камерой.

Табл. 7 дает основные параметры корректора быстрой обратной связи.

Трехмерная модель быстрого магнита-корректора показана на рис. 9.

Сердечник магнита представляет прямоугольную рамку из силового феррита марки N87 с апертурой 80 mm с четырьмя катушками по 32 витка медного проводника с сечением 1.0×2.8 mm. Длина ярма — 30 mm, по-

перечные габариты магнита 17.9×14 cm. Конструкция сердечника и специальная намотка катушек позволяют получить поперечную однородность интеграла магнитного поля 0.5% в апертуре 10×10 mm. Расчеты, выполненные с учетом стальной вакуумной камеры, показывают, что выбранная марка феррита позволяет за время линейного подъема тока питания от 0 до 2.8 A достичь значения интеграла магнитного поля $100 \text{ G} \times \text{cm}$, что достаточно для наших целей.

Заключение

Проведен анализ влияния сейсмических вибраций по данным измерений двумя независимыми организациями на площадке ЦКП „СКИФ“. Численное моделирование показало, что измеренный уровень сейсмических вибраций на площадке ускорителя может оказывать существенное влияние на отклонение замкнутой орбиты пучка электронов, превышая требования пользователей СИ на стабильность пучка. Для поддержания стабильности пучка рассмотрена система быстрой обратной связи, подобрано расположение быстрых корректоров, оценены их параметры и предложена конструкция магнита.

Финансирование работы

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда и Новосибирской области, грант № 22-27-20146.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, S. Sinyatkin, E. Levichev. *Phys. Rev. Accelerator and Beams*, **24**, 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704
- [2] D. Einfeld, J. Schaper, M. Plesko. In *Proceedings of PAC 95 and HEACC 95* (Dallas, USA, 1995), p. 177, DOI: 10.1109/PAC.1995.504602
- [3] G. Decker. In *Proceedings of DIPAC 2005* (Lyon, France, 2005), p. 233.
- [4] H. Huang, J. Kay. In *Proceedings of EPAC 2006* (Edinburgh, Scotland, 2006), p. 3338.
- [5] J.A. Balmer, D.J. Holder, H.L. Owen. In *Proceedings of EPAC 2000* (Vienna, Austria, 2000), p. 2328.
- [6] W. Bialowons, H. Ehrlichmann. *TESLA Report*, **10** (2005).
- [7] N. Simos, H. Amick, A. Soueid, M. Fallier. *Synchrotron Radiation News*, **32**, 4 (2019). DOI: 10.1080/08940886.2019.1654826
- [8] A.A. Emanov, A.F. Emanov, E.B. Levichev, V.M. Solovyev, I.N. Churkin, D.G. Korabelshchikov, S.V. Sinyatkin, V.V. Yankaitis, P.A. Piminov, A.A. Bakh, G.N. Baranov, A.V. Fateev, K.Yu. Karyukina, P.O. Polyansky, A.V. Durachenko, N.A. Serezhnikov, E.A. Gladyshev, V.V. Arapov, E.V. Shevkunova, I.A. Antonov, R.A. Ershov. *Seismic Instruments*, **58** (6), 635 (2022). DOI: 10.3103/S0747923922060044

- [9] P.A Dergach, G.N. Baranov, K.Yu. Karyukina, A.N. Drobchik. *Rus. J. Geophys. Technol.*, **3**, 4 (2022).
DOI: 10.18303/2619-563-2022-3-4
- [10] L. Farvacque. *Part of Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers* (Proceed., CERN Accelerator School, CAS, Grenoble, France, 1996), p. 287–302.
- [11] Электронный ресурс. Режим доступа: Accelerator toolbox.
<https://github.com/atcollab/at>
- [12] Электронный ресурс. Режим доступа: MAD-X.
<https://mad.web.cern.ch/mad/>
- [13] Y. Tian, K. Ha, L. Yu, W. Cheng, J. DeLong, L. Dalesio, W. Levine. *In Proceed. of ICALEPCS2015* (Melbourne, Australia, 2015), p. 37, ISBN 978-3-95450-148-9
- [14] Y.-R.E. Tan, T.D. Cornall, E.J. Vettoor, A. Michalczyk, N. Basten, D.J. Peake. *In Proceed. IBIC2015* (Melbourne, Australia, 2015), p. 297, ISBN 978-3-95450-176-2
- [15] E. Plouviez, K. Scheidt, J. M. Koch, F. Epaud. *In Proceed. IPAC2011* (San Sebastián, Spain, 2011), p. 480.
- [16] P. Leban, E. Janezic, M. Sjöström. *In Proceed. IPAC2014* (Dresden, Germany, 2014), p. 1748,
DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2014-TUPRI078
- [17] L. Sanfelici, D. Tavares, D. Felix Ferreira, S. Marques, F.H. Cardoso. *In Proceed. 2011 Particle Accelerator Conference* (NY., NY., USA, 2011), p. 597.