

РАСЧЕТ ИМПЕДАНСА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ НАКОПИТЕЛЯ ЦКП СКИФ

*М. А. Байструков^{а, б, 1}, Д. А. Никифоров^{а, б},
П. А. Пиминов^{а, б}, А. А. Краснов^{а, б}, Е. А. Ротов^а*

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

^б Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»,
Новосибирск, Россия

В настоящее время в Новосибирске ведется строительство источника синхротронного излучения поколения 4+ СКИФ. Его особенностью является малый эмиттанс при высоком токе пучка. Коллективные эффекты в динамике интенсивного пучка могут приводить к возникновению различных неустойчивостей и, соответственно, к ухудшению качества пучка или его полной потере. Для подавления нежелательных эффектов необходимо провести анализ взаимодействия пучка с различными элементами вакуумной камеры с целью минимизации их импедансов. В данной работе приведен расчет продольных и поперечных импедансов основных элементов вакуумной камеры накопителя СКИФ: резонатора основной гармоники, фланцевого соединения, компенсатора, датчика положения пучка, откачного порта. Рассчитаны суммарные когерентные потери, kick-фактор, а также суммарный эффективный импеданс, и оценены вклады каждого типа элементов в суммарные характеристики.

At present, the construction of a 4+ generation synchrotron radiation source SKIF is underway in Novosibirsk. Its feature is a small emittance at a high beam current. Collective effects in the dynamics of an intense beam can lead to various instabilities and, accordingly, to deterioration of the beam quality or its complete loss. To suppress undesirable effects, it is necessary to analyze the interaction of the beam with various elements of the vacuum chamber in order to minimize their impedances. This paper presents the calculation of the longitudinal and transverse impedances of the main elements of the vacuum chamber of the SKIF storage ring: fundamental harmonic resonator, flange connection, compensator, beam position monitor, and pumping port. The total coherent losses, the kick factor, and the total effective impedance are calculated, and the contributions of each type of elements to the total characteristics are estimated.

PACS: 07.85.Fe

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН был определен единственным исполнителем комплекса работ по изготовлению, сборке, поставке и пусконаладке технологически сложного оборудования ускорительного комплекса ЦКП СКИФ — источника синхротронного излучения поколения 4+. Одной из его

¹E-mail: M.A.Baistrukov@inp.nsk.su

ключевых особенностей является получение эмиттанса пучка $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$ с током пучка 400 мА при энергии частиц 3 ГэВ [1–3].

Достижению этих параметров препятствуют многие эффекты, в том числе и коллективные — это эффекты взаимодействия электромагнитных полей, возбуждаемых частицами пучка внутри вакуумной камеры ускорителя, с частицами этого же пучка. Наведенные поля и, следовательно, сила их воздействия на пучок зависит как от среднего тока пучка, так и от пикового тока в одном сгустке. В случае, когда наведенное поле затухает относительно медленно по сравнению с частотой обращения пучка, могут возникать резонансные условия, которые приводят к усилению наведенных полей. Последствия для пучка от подобных эффектов могут быть весьма разнообразными: потеря энергии частиц, деградация фазового объема, уменьшение интенсивности, вплоть до полной гибели пучка, увеличение потерь пучка, возбуждение когерентных и некогерентных колебаний отдельных сгустков или всего пучка, сдвиг бетатронных частот и т. д. Реалистичное аналитическое рассмотрение коллективных эффектов не представляется возможным, поэтому обычно проводят численное моделирование подобных процессов.

В данной работе приведен расчет продольных и поперечных импедансов основных элементов вакуумной камеры накопителя СКИФ: резонатора основной гармоники, фланцевого соединения, компенсатора, датчика положения пучка, откачного порта. Рассчитаны суммарные когерентные потери, kick-фактор, а также суммарный эффективный импеданс, и оценены вклады каждого типа элементов в суммарные характеристики.

1. ТЕОРИЯ

1.1. Wake-функция и импеданс. В разных источниках wake-функцию и импеданс вводят по-разному [4–6]. Для определенности в данной работе будем придерживаться следующих определений. Wake-функцию $\mathbf{W}(\tau)$ вводим как минус продольный интеграл силы Лоренца \mathbf{F}_L , действующей на пробный точечный заряд e , следующий на расстоянии $c\tau$ позади точечного заряда q , нормированный на q и e :

$$\mathbf{W}(\tau) = -\frac{1}{qe} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{F}_L(\tau, z) dz. \quad (1)$$

Для большинства задач достаточно рассмотреть монополярную продольную W_{\parallel} и дипольную поперечную \mathbf{W}_{\perp} wake-функции. В случае дипольной wake-функции нормировка производится не на заряд q , а на дипольный момент $|\mathbf{d}|$.

Заряд с продольным распределением $\lambda(\tau)$ создает соответствующий wake-потенциал $V(\tau)$, который рассчитывается через свертку wake-функции $W(\tau)$ с $\lambda(\tau)$:

$$V(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} W(t)\lambda(\tau - t) dt. \quad (2)$$

Здесь τ отсчитывается против движения пучка, поэтому $W(\tau < 0) = 0$. Также требуется нормировка $\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(\tau) d\tau = 1$.

В частотной области вакуумная камера характеризуется импедансом $Z(\omega)$ — преобразованием Фурье от wake-функции:

$$Z_{\parallel}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{\parallel}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad Z_{\perp}(\omega) = -i \int_{-\infty}^{\infty} W_{\perp}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (3)$$

1.2. Интегральные характеристики циклических ускорителей. Для оценки влияния элементов вакуумной камеры вводят интегральные параметры взаимодействия пучка с импедансом — продольный фактор когерентных потерь k_{\parallel} (longitudinal loss factor) и поперечный kick-фактор k_{\perp} :

$$k_{\parallel} = \int_{-\infty}^{\infty} V_{\parallel}(t) \lambda(t) dt, \quad k_{\perp} = - \int_{-\infty}^{\infty} V_{\perp}(t) \lambda(t) dt. \quad (4)$$

Также в случае линейного ускорителя loss-фактор и kick-фактор могут быть выражены через соответствующие импедансы следующим образом:

$$k_{\parallel} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_{\parallel}(\omega) h(\omega) d\omega, \quad k_{\perp} = -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_{\perp}(\omega) h(\omega) d\omega, \quad (5)$$

где $h(\omega) = \tilde{\lambda}(\omega)\tilde{\lambda}^*(\omega)$. Здесь $\tilde{\lambda}(\omega)$ — это преобразование Фурье от продольного распределения заряда. Величина когерентных потерь ΔE пучка с зарядом q пропорциональна loss-фактору, а приращение поперечного импульса Δp_x частицы пучка с зарядом e — kick-фактору и поперечному смещению x :

$$\Delta E = -k_{\parallel}q^2, \quad \Delta p_x = \frac{qe}{c}k_{\perp}x, \quad (6)$$

где c — это скорость света.

Рассмотрим случай циклического ускорителя. Пусть период обращения пучка и циклическая частота равны соответственно T_0 и ω_0 . Хорошим приближением для тока пучка за все время $\lambda(\tau)$ является свертка суммы δ -функций $\lambda_{\delta}(\tau)$ и формы пучка за один период $\lambda_b(\tau)$:

$$\lambda(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda_b(\tau - t) \lambda_{\delta}(t) dt, \quad (7)$$

$$\lambda_{\delta}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\tau - nT_0). \quad (8)$$

Пусть сгусток имеет гауссово продольное распределение заряда $\lambda_s(\tau)$:

$$\lambda_s(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\tau}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma_{\tau}^2}\right), \quad (9)$$

а в циклическом ускорителе имеется N сепаратрис. Рассмотрим случай, когда сепаратрисы заполнены неравномерно. Введем a_n — отношение заряда сгустка на сепаратрисе с номером n к полному заряду пучка. Тогда форму пучка за один период $\lambda_b(\tau)$ можно выразить через сумму:

$$\lambda_b(\tau) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \lambda_s \left(\tau - \frac{T_0 k}{N} \right). \quad (10)$$

Чтобы упростить дальнейшие расчеты, перейдем к фурье-образам. Для начала преобразуем формулу для фактора когерентных потерь (4), учитывая, что расчет ведем для сепаратрисы с номером n :

$$\langle k_{\parallel} \rangle_n = \int_{-\infty}^{\infty} V_{\parallel}(t) \lambda_n(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{V}_{\parallel}(\omega) \tilde{\lambda}_n^*(\omega) d\omega. \quad (11)$$

Здесь $\lambda_n(t) = \lambda_s(t - (T_0 n/N))$ — распределение сгустка на сепаратрисе с номером n , а величины с тильдами — это фурье-образы соответствующих величин без тильд. Чтобы найти образ суммы δ -функций, воспользуемся формулой суммирования Пуассона

$$\tilde{\lambda}_{\delta}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-i\omega n T_0} = \omega_0 \sum_{p=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - p\omega_0). \quad (12)$$

Далее найдем фурье-образ тока пучка за все время $\lambda(\tau)$, воспользовавшись теоремой о свертке:

$$\tilde{\lambda}(\omega) = \tilde{\lambda}_b(\omega) \tilde{\lambda}_{\delta}(\omega) = \omega_0 \tilde{\lambda}_s(\omega) \sum_{p=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - p\omega_0) \alpha_p, \quad (13)$$

где α_p — это весовой коэффициент гармоники, возникающий из-за суммирования в $\tilde{\lambda}_b(\omega)$:

$$\alpha_p = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \exp \left(-2\pi i \frac{k}{N} p \right). \quad (14)$$

Теперь подставим все в уравнение (11) и получим

$$\langle k_{\parallel} \rangle_n = \frac{\omega_0}{2\pi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} Z_{\parallel}(\omega_p) h(\omega_p) \alpha_p \exp \left(2\pi i \frac{n}{N} p \right), \quad (15)$$

где $\omega_p = p\omega_0$, а $h(\omega) = \tilde{\lambda}_s(\omega) \tilde{\lambda}_s^*(\omega) = e^{-\omega^2 \sigma_{\tau}^2}$ для гауссова сгустка. Для того чтобы получить средний фактор когерентных потерь по пучку, нужно усреднить loss-фактор (15) с весовым коэффициентом a_n :

$$\langle k_{\parallel} \rangle = \frac{\omega_0}{2\pi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} Z_{\parallel}(\omega_p) h(\omega_p) \alpha_p \alpha_p^*. \quad (16)$$

Аналогичные действия можно проделать и для kick-фактора. В этом случае получим

$$\langle k_{\perp} \rangle = \frac{\omega_0}{2\pi i} \sum_{p=-\infty}^{\infty} Z_{\perp}(\omega_p) h(\omega_p) \alpha_p \alpha_p^* \quad (17)$$

Однако данная формула подходит лишь для оценки kick-фактора, поскольку не учитывает смещение пучка, тем не менее в данной работе мы будем пользоваться ей.

Еще одной интегральной характеристикой является эффективный импеданс $(Z_{\parallel}/n)_{\text{eff}}$ [4]. В данной работе будем рассчитывать его по следующей формуле:

$$\left(\frac{Z_{\parallel}}{n} \right)_{\text{eff}} = \frac{\sum_{p=-\infty}^{+\infty} Z_{\parallel}(\omega_p) h(\omega_p) \frac{\omega_0}{\omega_p}}{\sum_{p=-\infty}^{+\infty} h(\omega_p)} \quad (18)$$

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Рассматриваемые элементы. Вакуумная камера накопителя ЦКП СКИФ состоит из множества элементов [3, 7]. Рассмотрим только несколько типов элементов: резонатор основной гармоники, фланцевое соединение, компенсатор, датчик положения пучка и откачной порт. Оставшуюся часть вакуумной камеры приблизим вакуумной камерой круглого сечения.

Резонатор основной гармоники разрабатывался другим коллективом и за последнее время не претерпел изменений. В данной работе используются импедансы только этого одномодового резонатора. Подробную информацию о нем вы можете найти в источниках [2, 7, 8].

В данном разделе приводятся рисунки моделей элементов. Однако обратите внимание, что эти модели являются упрощенными для расчета импедансов элементов. Внешние части и крепежные элементы в них отсутствуют.

Во всех рассматриваемых элементах планируется использовать четыре основных материала: титановый сплав ВТ1-0, алюминиевый сплав АД31, алюминиевый сплав А2219, медь. На рисунках они обозначены цветом: синий — ВТ1-0, желтый — АД31, фиолетовый — А2219, оранжевый — медь. В расчетах используются следующие удельные сопротивления материалов: ВТ1-0 — $4,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, АД31 — $3,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, А2219 — $5,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, медь — $1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

2.1.1. Фланцевое соединение. Одним из самых многочисленных элементов в вакуумной камере накопителя является фланцевое соединение. В процессе работы рассматривалось несколько вариантов этого элемента. Изначально был предложен вариант фланцевого соединения с расширением центральной части и соединением типа Matsumoto–Ohtsuka (фланцы МО-типа) [3, 7]. Это соединение состояло из конусообразного расширения от диаметра 27 мм до диаметра 29,5 мм длиной 7,2 мм, медного уплотнительного кольца длиной 1 мм и конусообразного сужения до прежнего диаметра длиной 17,5 мм. Однако этот вариант был отброшен из-за больших добротностей и шунтовых сопротивлений резонансных пиков.

Далее рассматривался вариант стандартного ConFlat. Он состоял из медного уплотнительного кольца длиной 2 мм и внутренним диаметром 29 мм, которое с обеих сторон зажималось вакуумными трубами с внутренним диаметром 27 мм, на торцах которых располагался цилиндрический зуб с внутренним диаметром 31,7 мм. При расчетах импеданса полагали, что расстояние между торцом вакуумной камеры и медным кольцом составляло 0,2 мм. Этот вариант обладал меньшими добротностями и шунтовыми сопротивлениями резонансных пиков, но большей индуктивной частью.

Было решено рассмотреть другой вариант фланцевого соединения — вариант соединения, схожий с предыдущим, но без цилиндрического зуба и с измененными размерами. Он состоял из медного уплотнительного кольца длиной 1 мм и внутренним диаметром 30 мм, которое с двух сторон зажималось вакуумными трубами с внутренним диаметром 27 мм. Этот вариант обладал лучшим импедансом, чем предыдущие варианты. Однако эти фланцевые соединения моделировались без выреза в горизонтальной плоскости.

Следующий вариант получился путем модификации предыдущего. Было принято решение уменьшить расстояние между соединяемыми элементами так, чтобы зазор составлял 0,2 мм. Также в новой версии появились вырезы в горизонтальной плоскости, которые нужны для уменьшения нагрева фланцевого соединения за счет синхротронного излучения. Импедансы такого соединения обладали лучшей продольной и поперечной индуктивной компонентой, чем предыдущие варианты. Таким образом, фланцевое соединение было оптимизировано по импедансу. В настоящее время планируется использовать последний вариант.

На рис. 1 представлены подробный продольный срез в районе уплотнительного кольца с размерами и общий вид продольного среза фланцевого соединения. Внутрен-

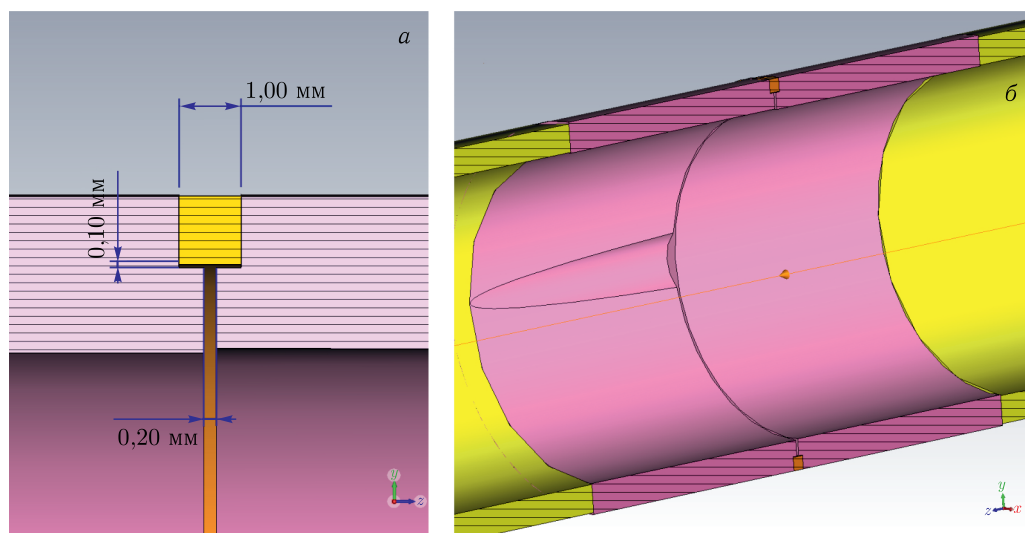


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Продольный срез фланцевого соединения в районе уплотнительного кольца с размерами (а) и общий вид с вырезом в горизонтальной плоскости (б)

ний диаметр трубы равен 27 мм, внутренний диаметр уплотнительного кольца после уплотнения составляет 29,8 мм. Вырез в горизонтальной плоскости, представленный на рис. 1, б, имеет форму цилиндра радиусом 3 мм, с максимальным углублением 0,8 мм в районе уплотнительного кольца. Длина выреза 21,9 мм.

2.1.2. Датчик положения пучка. Датчик положения пучка (ДПП) в процессе оптимизации не претерпел значительных изменений. Изначально была рассмотрена версия с большим внутренним диаметром из-за первой версии фланцевого соединения [3, 7], но далее, при переходе к следующим вариантам соединения, внутренний диаметр ДПП был приравнен к диаметру трубы. В таком варианте сам ДПП обладает небольшим импедансом, однако фланцевые соединения, которыми он крепится к вакуумной камере, и вырез в горизонтальной плоскости для уменьшения нагрева от синхротронного излучения (СИ) увеличивают импеданс данного элемента, особенно индуктивную составляющую.

На рис. 2 представлен поперечный (а) и продольный (б) срезы датчика положения пучка. Вырез в горизонтальной плоскости на фланцевом соединении аналогичен вырезу на рис. 1. Сам датчик положения пучка имеет длину 18 мм. Его вырез в горизонтальной плоскости имеет форму цилиндра радиусом 3 мм с постоянным максимальным углублением 0,8 мм. Диаметр измерительных пятчиков составляет 6 мм. Волновое сопротивление выводов от них равно 50 Ом.

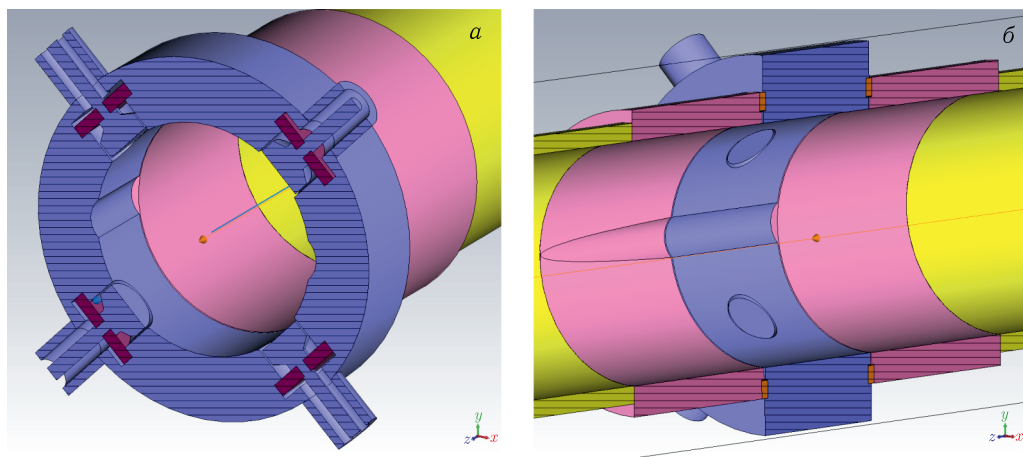


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Поперечный (а) и продольный (б) срезы датчика положения пучка

2.1.3. Откачной порт. Откачной порт представляет собой круглую вакуумную камеру с продольными прорезями, через которые газ откачивается из камеры. Для уменьшения импеданса можно варьировать конфигурацию прорезей. Изначально был предложен вариант откачного порта с прорезями максимальной длины, которую позволяла камера откачки. Однако такой откачной порт далек от оптимального. Поэтому далее было рассмотрено несколько вариантов откачных портов: с длинными прорезями, с прорезями, дополненными отверстиями, с широкими и узкими прорезями и т. д.

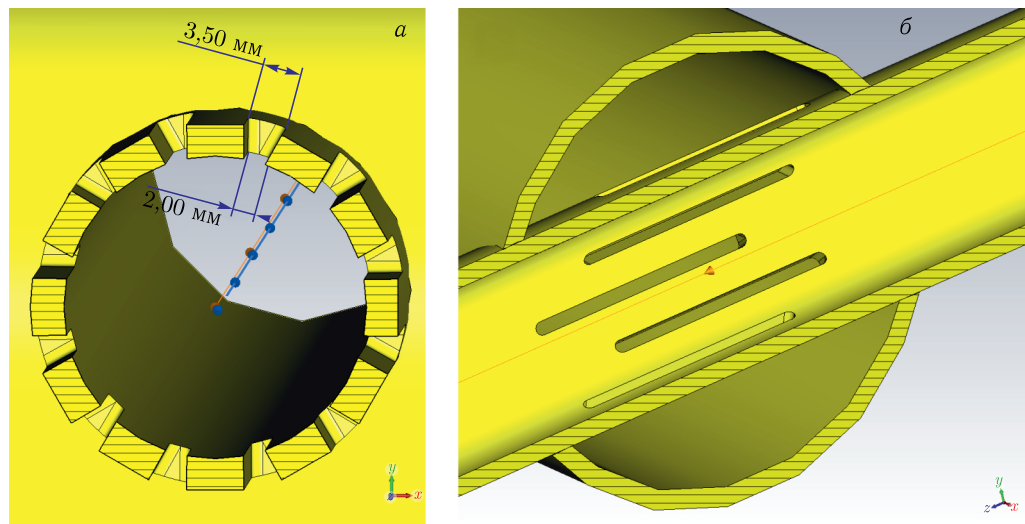


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Поперечный (а) и продольный (б) срезы откачного порта

По итогам процесса оптимизации на сегодня в качестве основного варианта рассматривается откачной порт со смещенными клиновидными прорезями. Поперечный (рис. а) и продольный (рис. б) срезы этого варианта откачного порта представлены на рис. 3. Длина прорезей составляет 36 мм, прорези смещены относительно друг друга на 10 мм. Толщина стенки вакуумной камеры равна 3 мм, внутренний диаметр камеры откачки 65 мм.

2.1.4. Компенсатор. Компенсатор служит для снятия механического напряжения вакуумной камеры, возникающего, например, из-за нагрева в процессе работы. Компенсатор состоит из двух цилиндров: одного цельного и одного с продольными разрезами, чтобы он мог без большого усилия двигаться вдоль цельного цилиндра. Однако на сегодня рассчитан импеданс только для упрощенной модели, которая не содержит продольных прорезей, так как работа над оптимизацией данного элемента еще идет. Продольный срез использованной модели с указанием размеров представлен на рис. 4.

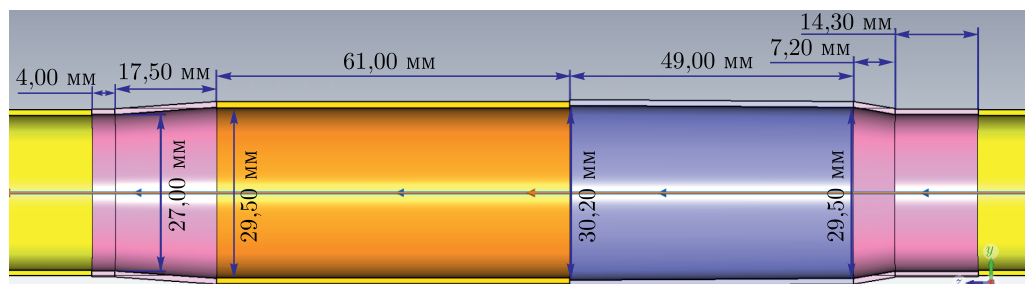


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Продольный срез компенсатора с указанием размеров

2.2. Результаты. Для всех элементов были получены продольные монопольные и поперечные дипольные импедансы. На рис. 5 приведены графики импедансов всех элементов. Поскольку предполагается, что длина сгустка ($c\sigma_T$) в вакуумной камере будет не менее 5 мм, было решено рассчитывать импеданс до частоты 20 ГГц. Исключение составляет лишь продольный импеданс основной гармоники (рис. 5, *e*), который посчитан до 13 ГГц. В дальнейшем планируется провести повторный расчет для этого элемента до частоты 20 ГГц. Из графиков видно, что в целом горизонтальные (рис. 5, *a, б*) и вертикальные (рис. 5, *в, г*) импедансы очень похожи. Есть лишь

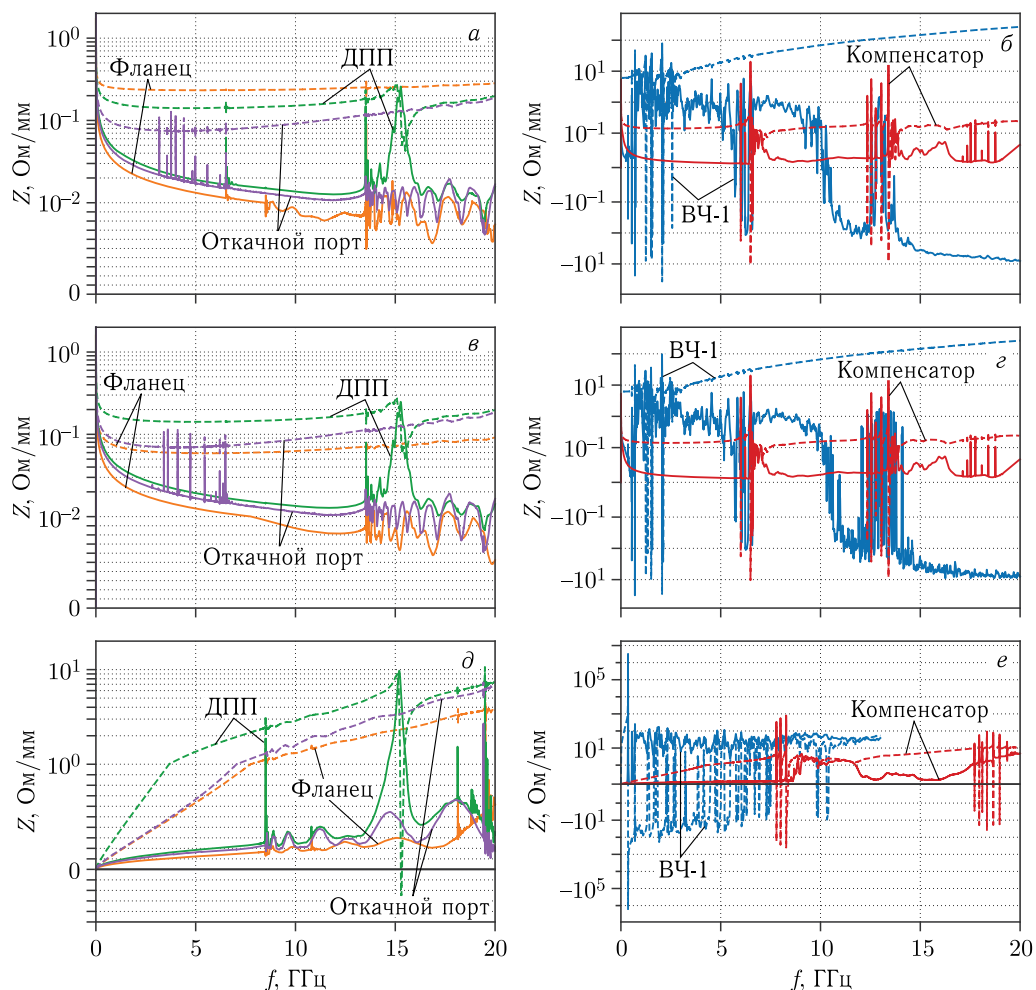


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Графики горизонтальных (*a, б*), вертикальных (*в, г*) и продольных (*д, e*) импедансов элементов. Сплошные линии соответствуют реальной части импеданса, а штриховые — мнимой. По оси ординат использован симметрично-логарифмический масштаб

**Интегральные характеристики вакуумной камеры накопителя с поэлементным вкладом
в суммарное значение**

Параметр	N_{in}	U_s , кВ		$(Z/n)_{eff}$, МОм		k_x , В/(пКлм)		k_y , В/(пКлм)	
		0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5
σ_s , см		0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5
Сумма		6,71	1,78	290,79	678,90	9,63	1,88	9,22	1,79
Поэлементный вклад в суммарное значение, %									
Остальное	1	10,42	7,50	2,44	1,80	1,58	4,07	1,65	4,27
ВЧ-1	5	48,93	69,95	64,50	83,14	51,50	19,08	52,11	19,63
Фланец	36	1,28	0,87	1,11	0,54	3,24	5,30	1,12	1,84
ДПП	222	13,48	8,07	14,34	6,65	13,75	22,53	14,49	23,84
Компенсатор	96	9,11	2,44	5,41	2,23	7,22	11,83	7,54	12,41
Откачной порт	353	16,79	11,17	12,20	5,64	22,70	37,19	23,09	38,00

Примечание. N_{in} — количество элементов соответствующего типа в вакуумной камере. Элемент «остальное» — замена нерассчитанных элементов вакуумной камерой круглого сечения. ВЧ-1 — резонатор основной гармоники.

некоторые отличия, связанные с вырезами в горизонтальной плоскости у фланцевых соединений и датчиков положения пучка. Также видно, что импедансы фланцевых соединений, откачных портов и датчиков положения пучка не превышают 1 Ом/мм для поперечных импедансов (см. рис. 5, а, в) и 10 Ом для продольных (см. рис. 5, д).

Суммарные интегральные характеристики приведены в таблице. Вместо фактора когерентных потерь $k_{||}$ в таблице приведено напряжение потерь $U_s = \langle k_{||} \rangle q_0$, где q_0 — это заряд пучка при токе $I = 400$ мА. Таким образом, U_s показывает увеличение суммарного ускоряющего напряжения на резонаторах первой гармоники, связанное с когерентными потерями. Из когерентных потерь исключены потери на основной моде резонатора, так как они компенсируются сохранением ускоряющего напряжения. Расчеты проведены для режима, когда равномерно заполнено 560 из 567 сепаратрис подряд.

Из таблицы видно, что напряжение когерентных потерь U_s порядка 1 кВ, что много меньше, чем потери на СИ, которые составляют порядка 1 МВ. Также из поэлементного вклада видно, что основной вклад в большинство характеристик вносит резонатор основной гармоники (ВЧ-1), а в kick-факторы есть заметный вклад от откачных портов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитан продольный и поперечный импеданс основных элементов вакуумной камеры накопителя ЦКП СКИФ. Все элементы, кроме компенсатора, оптимизированы по импедансу. Для каждого элемента найдены интегральные характеристики. Проведено сравнение вкладов каждого элемента в суммарные интегральные характеристики кольца с учетом числа их вхождений. Выявлены элементы с наибольшим вкладом в каждую из характеристик. Полученные импедансы можно применять в расчетах коллективных эффектов для определения порогов неустойчивостей и инкрементов их роста. В настоящее время также ведется работа по расчету и оптимизации остальных элементов вакуумной камеры.

Работа частично выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0041).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://srf-skif.ru/>
2. *Bukhtiyarov A. V. et al.* Synchrotron Radiation Facility “Siberian Circular Photon Source” (SRF SKIF) // *Crystallogr. Rep.* 2022. V. 67, No. 5. С. 690–711.
3. *Анашин В.В. и др.* Вакуумная система источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» // *Вакуум. наука и техника.* 2022. С. 163–176.
4. *Khan S.* Collective Phenomena in Synchrotron Radiation Sources. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
5. *Смалюк В.В.* Обзор коллективных неустойчивостей пучка в электрон-позитронных накопителях // *ЭЧАЯ.* 2012. Т. 43, № 2. С. 414.
6. *Chao A. W.* Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators // *Wiley Series in Beam Physics and Accelerator Technology.* 1993.
7. *Акимов А.В., Актершев Ю.С., Анашин В.В., Андрианов А.В., Анчугов О.В., Арсентьева М.В., Бак П.А., Баранов Г.Н., Барняков А.М., Батраков А.М., Беликов О.В., Белова Л.Л., Бехтенов Е.А., Бухтияров В.И., Богомяжков А.В., Борин В.М., Буренков Д.Б., Винник Д.С., Волков В.Н., Вонда Е.С. и др.* Основные системы накопителя // *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ»:* Сб. ст.: В 3 т. / Под общ. ред. К.И. Шефер; Сост. Е.Б. Левичев. Новосибирск, 2022. Т. 2. С. 180–373.
8. *Акимов А.В., Актершев Ю.С., Анашин В.В., Андрианов А.В., Анчугов О.В., Арсентьева М.В., Бак П.А., Баранов Г.Н., Барняков А.М., Батраков А.М., Беликов О.В., Белова Л.Л., Бехтенов Е.А., Бухтияров В.И., Богомяжков А.В., Борин В.М., Буренков Д.Б., Винник Д.С., Волков В.Н., Вонда Е.С. и др.* Динамика пучка в накопителе // Там же. С. 98–179.

Получено 15 сентября 2023 г.