

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ КОЛЛАЙДЕРА NICA

П. Р. Зенкевич¹, А. А. Коломиец

Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

Моделирование импедансов связи отдельных элементов коллайдера NICA проводится с целью определения на ранней стадии проектирования возможных ограничений на интенсивность пучка, выявления элементов структуры, которые могут быть основными источниками импедансов, формулирования предложений по оптимизации геометрии элементов структуры для снижения влияния коллективных эффектов на динамику пучка. Для моделирования используется коммерческая программа CST Studio Suite. Результаты моделирования для каждого исследованного элемента структуры сохраняются в виде вэйк-потенциалов, которые могут прямо использоваться в моделирующей динамике пучка программе HEADTAIL. Импедансы связи рассчитываются из вэйк-потенциалов с помощью преобразования Фурье.

A simulation of the coupling impedances of the NICA collider chamber elements is made for optimization of these elements geometry to diminish their influence on excitation of the collective instabilities. For simulation the commercial code CST Studio Suite is used. Results of simulation allow us to calculate wake potentials which can be used directly in HEADTAIL code for modelling of the beam dynamics. Coupling impedances of the elements are calculated from wake potentials using Fourier transform.

PACS: 29.20.db; 07.05.Fb

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие между частицами пучка и окружающими пучок элементами структуры ускорителя является одним из основных факторов, накладывающих ограничения на достижимые параметры ускорительной установки. На стадии проектирования новой установки исследование взаимодействия пучка с проектируемыми узлами ускорителя является необходимым условием для достижения заданных параметров.

Эффект взаимодействия характеризуется вэйк-полями, которые генерируют частицы, движущиеся в передней части сгустка, и которые влияют на движение частиц, следующих за ними, и импедансами, представляющими вэйк-поля в частотной области.

Импедансы ответственны за сдвиг частот колебаний пучка, возбуждение нескольких типов когерентных неустойчивостей, рост эмиттанса пучка и, соответственно,

¹E-mail: zenkevich@itep.ru

за потери частиц. Для оценки сдвига частот и порога неустойчивости необходимо определение полного импеданса ускорительной установки [2]. Импедансы отдельных узлов могут быть определены по результатам теоретического анализа, по данным измерения параметров пучка в действующих установках, стендовыми измерениями и компьютерным моделированием. Очевидно, что на стадии проектирования компьютерное моделирование является наиболее надежным способом определения вклада каждого отдельного элемента структуры в величину полного импеданса ускорительной установки [3, 4].

Схема кольца с основными элементами структуры коллайдера NICA показана на рис. 1 [5]. Кольцо имеет форму беговой дорожки с двумя арками и двумя длинными прямолинейными секциями. Вакуумная камера арки формируется прямолинейными отрезками камерами дипольных магнитов с эллиптическим сечением и цилиндрическими камерами квадрупольных магнитов, имеющими участки с разными диаметрами. Отдельные участки камеры арки соединяются между собой сильфонными соединениями. Большое число неоднородностей геометрии и сильфонных соединений делают арки источником значительных импедансов коллайдера.

Размещенные на прямолинейных участках разнообразные устройства: резонаторы высокочастотной системы, пикапы системы стохастического охлаждения, участок электронного охлаждения, камеры детекторов, устройства ввода и вывода пучка, коллиматоры — также являются источниками импеданса, и вклад каждого устройства в полный импеданс установки должен быть определен на стадии проектирования.

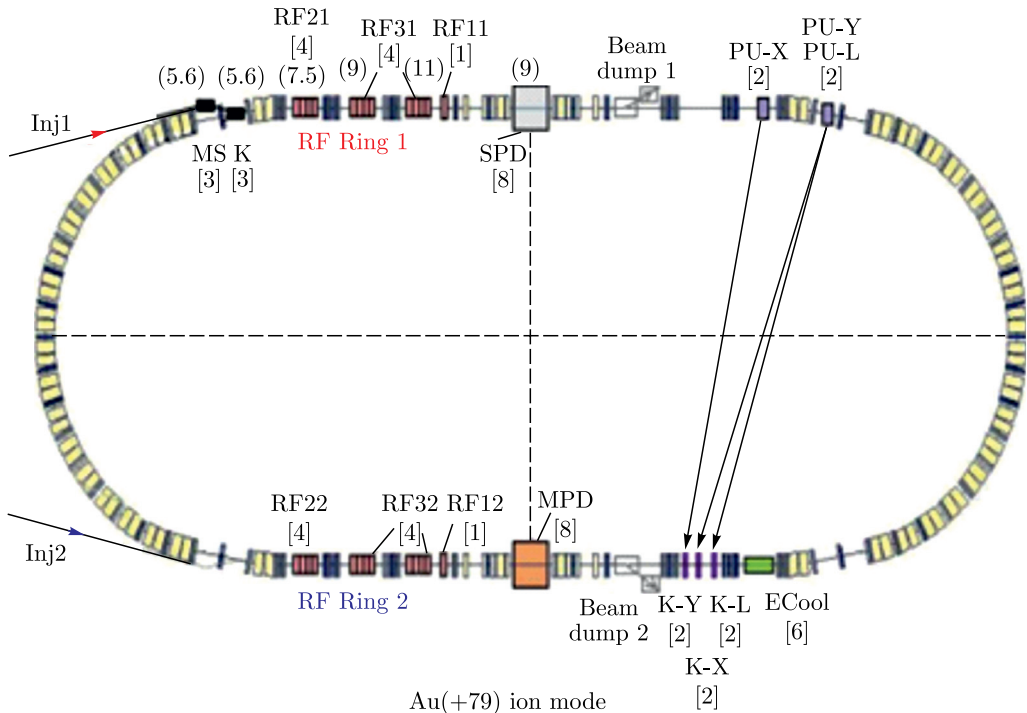


Рис. 1. Схема кольца коллайдера

CST STUDIO

В данной работе для моделирования вэйк-потенциалов и расчета соответствующих импедансов в отдельных узлах структуры коллайдера NICA использовалась программа CST Studio [1]. Программа располагает специальным блоком Wakefield Solver для электромагнитных расчетов, который моделирует генерацию вэйк-потенциала в исследуемой модели при прохождении через нее генерирующего сгустка частиц. В этом блоке решаются уравнения Максвелла во временной области. Стандартным результатом расчета программы являются вэйк-потенциалы, создаваемые сгустком частиц с гауссовским распределением плотности частиц вдоль сгустка. Моделирование вэйк-поля в Wakefield Solver программы CST Studio иллюстрируется рис. 2. На нем показана простейшая модель, представляющая собой небольшую неоднородность цилиндрической вакуумной камеры, поле генерирующего сгустка и поле в исследуемом элементе.

В Wakefield Solver вэйк-потенциал (включая продольную и поперечные компоненты) рассчитывается по формуле

$$\mathbf{W}(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \frac{1}{q_1 q_0} \int_0^L dz [\mathbf{E}(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t) + \mathbf{v} \times \mathbf{B}(x_1, y_1, x_2, y_2, z, t)]_{t=(z+s)/c}, \quad (1)$$

где q_0 — полный заряд сгустка, генерирующего поле в исследуемом элементе с длиной L ; q_1 — пробный заряд, следующий за сгустком на расстоянии s ; x_1, y_1 — поперечное смещение траектории движения сгустка от оси элемента; x_2, y_2 — поперечное смещение траектории пробного заряда.

Под продольным вэйк-потенциалом обычно понимается компонента потенциала (1), образованная только продольным электрическим полем, при условии, что сгусток и пробный заряд движутся по оси исследуемого элемента:

$$W_{||}(z) = W_{||}(0, 0, 0, 0, z).$$

В элементе с осевой или зеркальной симметрией сгусток, движущийся по оси, не создает поперечных сил, действующих на пробный заряд, также движущийся по оси. В этом случае для расчета поперечного вэйк-потенциала необходимо задавать смещение от оси сгустка или пробного заряда. Первое приближение разложения поперечных

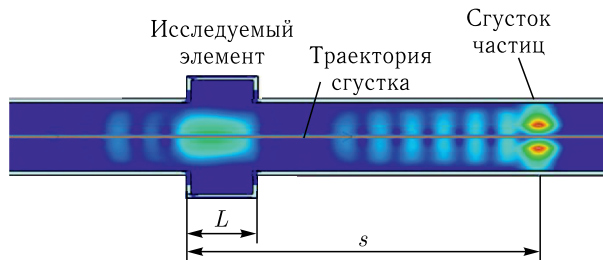


Рис. 2. Моделирование вэйк-поля в Wakefield Solver

компонент потенциала по степеням поперечного смещения имеет следующий вид [6]:

$$\begin{aligned} W_x(z) &= W_x(0, 0, 0, 0, z) + \nabla_x W_x(0, 0, x_1, y_1, z)x_1 + \nabla_x W_x(x_0, 0, 0, 0, z)x_0, \\ W_y(z) &= W_x(0, 0, 0, 0, z) + \nabla_y W_y(0, 0, 0, y_1, z)y_1 + \nabla_y W_y(0, y_0, 0, 0, z)y_0. \end{aligned} \quad (2)$$

В правых частях выражений (2) первый член представляет собой постоянную составляющую на оси исследуемого элемента. Для элементов с осевой или зеркальной симметрией данный член равен нулю. Второй член выражений принято называть в англоязычной литературе *dipolar* или *driving*, и ниже он будет обозначаться как $W_{x,y}^{dip}$. Третий член называется *quadrupolar* или *detuning* и будет обозначен как $W_{x,y}^{quad}$.

Таким образом, для получения продольного потенциала необходимо проводить моделирование для случая, когда траектория сгустка и путь интегрирования совпадают с геометрической осью исследуемого элемента, а для получения компонент $W_{x,y}^{dip}$ и $W_{x,y}^{quad}$ следует проводить моделирование, смещая траекторию сгустка и/или путь интегрирования так, как это показано на рис. 3 [7]. Смещение должно выбираться таким образом, чтобы, с одной стороны, сохранялось условие линейности разложения, а с другой — чтобы компоненты поперечного импеданса были определены достаточно четко.

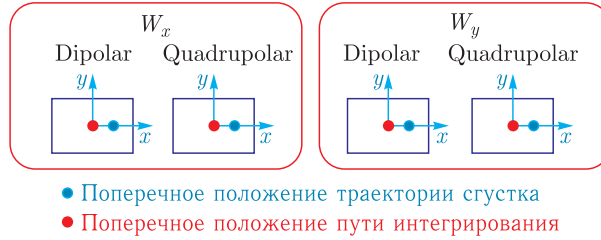


Рис. 3. Задание положения траектории сгустка и пути интегрирования для расчета поперечных вэйк-потенциалов

Полученные в результате моделирования вэйк-потенциалы позволяют определить соответствующие импедансы, используя следующие соотношения:

$$Z_{||}(\omega) = -\frac{\int_{-\infty}^{\infty} W_{||}(s) e^{-i\omega s} ds}{\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s) e^{-i\omega s} ds}, \quad (3)$$

$$Z_{\perp}(\omega) = i \frac{\int_{-\infty}^{\infty} W_{\perp}(s) e^{-i\omega s} ds}{\int_{-\infty}^{\infty} \lambda(s) e^{-i\omega s} ds}. \quad (4)$$

Для каждого исследуемого элемента структуры коллайдера в соответствующую базу данных вносились:

- продольный потенциал w_z ,
- постоянная, дипольная и квадрупольная компоненты поперечного потенциала в плоскости X w_{x0} , w_x^{dip} , w_x^{quad} ,

• постоянная, дипольная и квадрупольная компоненты поперечного потенциала в плоскости Y w_{y0} , w_y^{dip} , w_y^{quad} .

В базе данных сохранялись и соответствующие импедансы:

- $Z_{||}$,
- Z_{x0} , Z_x^{dip} , Z_x^{quad} ,
- Z_{y0} , Z_y^{dip} , Z_y^{quad} .

Эти данные являются достаточными как для численного моделирования движения пучка в коллайдере программой HEADTAIL, так и для аналитических оценок его параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРЫ КОЛЛАЙДЕРА

Ниже приведены результаты моделирования импедансов связи, полученные к марту 2019 г. Список рассмотренных элементов структуры коллайдера приведен в табл. 1.

Таблица 1. Элементы структуры коллайдера

Элемент структуры	Количество
Арки	
Камера дипольного магнита	80
Камера квадрупольного магнита	40
Сильфон	120
Пикап X	20
Пикап Y	20
ВЧ-станции	
ВЧ-1	1
ВЧ-2	4
ВЧ-3	8
Прямые участки	
МРД	1
Кикер ССО	?
Пикап СЭО	8
Камера инжекции электронного пучка	2
Коллиматор	4
Кикер	1

На рис. 4 и 5 приведены полные продольный и поперечный импедансы кольца, полученные суммированием импедансов отдельных элементов за исключением ВЧ-станций. Суммирование поперечных импедансов проводилось в соответствии с формулой

$$Z_{\perp}(f) = \sum_{i=1}^N \frac{\langle \beta_{\perp}^i \rangle}{\langle \beta_{\perp}^{\text{ring}} \rangle} Z_{\perp}^i(f),$$

где $\langle \beta_{\perp}^i \rangle$ — средняя бета-функция в элементе арки с номером i ; $\langle \beta_{\perp}^{\text{ring}} \rangle$ — средняя бета-функция кольца и $Z_{\perp}^i(f)$ — поперечный импеданс элемента арки с номером i .

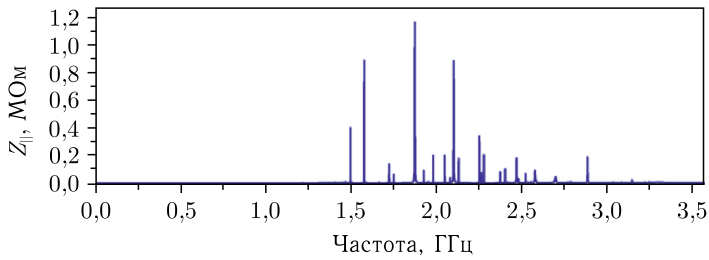
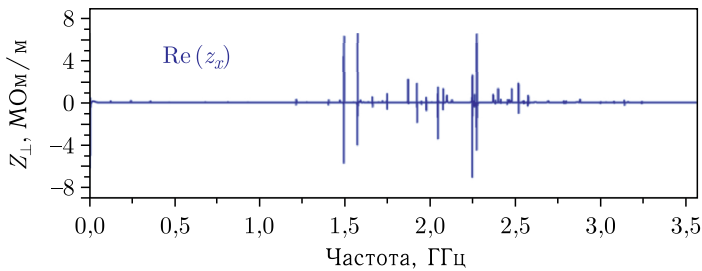


Рис. 4. Продольный импеданс кольца

Рис. 5. Поперечный импеданс Z_x кольца

Как видно из приведенных рисунков, импеданс кольца четко разделяется на низкочастотную (ниже 100 МГц) и высокочастотную части. Эффективный импеданс для номинальной длительности сгустка коллайдера определяется только импедансом при низкой частоте. На рис. 6 и 7 показаны продольный и поперечный импедансы в диапазоне низких частот. Продольный импеданс в этом диапазоне пренебрежимо мал. Поперечный импеданс в основном определяется параметрами вакуумной камеры. Высокочастотные резонансные значения импеданса влияют на микроволновые эффекты внутри пучка. В высокочастотной области импеданс носит резонансный характер. Сводка резонансов и их основные характеристики приведены в табл. 2 и 3.

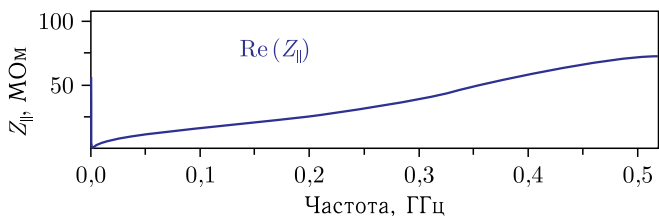


Рис. 6. Продольный импеданс кольца при частотах ниже 500 МГц

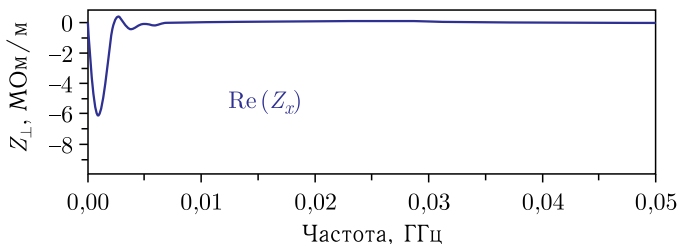


Рис. 7. Поперечный импеданс кольца при частотах ниже 50 МГц

Таблица 2. Наиболее опасные поперечные резонансы и их характеристики

Параметр	Номер резонанса									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота, ГГц	0,584	0,825	1,490	1,578	1,865	2,109	2,248	2,347	2,381	2,68
Z_{\perp} , МОм/м	2,781	1,576	3,76	6,921	30,89	10,18	141,3	16,18	26,63	8,24
Добротность	6	55	261	250	103	53	340	123	13,1	158

Таблица 3. Наиболее опасные продольные резонансы и их характеристики

Параметр	Номер резонанса											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	
Частота, ГГц	1,50	1,58	1,68	1,87	1,98	2,09	2,25	2,38	2,46	2,68	2,90	
Z_{\parallel} , 10^5 Ом	1,87	4,28	1,52	8,78	1,42	7,13	3,08	1,58	2,5	51	0,24	
Добротность Q	245	272	108	106	254	119	351	140	129	158	50	

Анализ показал, что все эти неоднородности возникают из-за двух дефектов в камере в арках: 1) неэкранированных сифонов; 2) скачка диаметра камеры вблизи квадрупольных линз. После устранения этих неоднородностей резонансы практически исчезают.

Приведенные на рис. 6 и 7 импедансы важны для расчета эффективного импеданса, который определяет устойчивость колебаний сгустков.

Следует отметить, что основной вклад в высокочастотную часть суммарных импедансов вносят элементы арок. Это объясняется наличием большого числа неоднородностей в этих элементах и их значительным количеством.

Для определения импедансов ВЧ-станций проводилось моделирование соответствующих резонаторов с использованием Eigenmode Solver программы CST Studio. Из всех резонансов, полученных таким образом, отбирались только те, которые возбуждались пучком в результате использования Wakefield Solver. Данные резонансов для резонаторов каждой ВЧ-станции приведены в табл. 4–6.

Таблица 4. Параметры резонансов станции ВЧ-1

Частота резонанса f_r , МГц	R_s , Ом	Q
118	983	339
273	2212	1334
466	955	1627
1411	38130	3324
1723	11780	3596
2180	$1,152 \times 10^6$	14373

Таблица 5. Параметры резонансов станции ВЧ-2

Частота резонанса f_r , МГц	R_s , 10^3 Ом	Q
452	4,9	1674
1177,6	6,74	1857
1897,9	19,8	3500

Таблица 6. Параметры резонансов станции ВЧ-3

Частота резонанса f_r , МГц	R_s , Ом	Q
30,5	$9,7 \cdot 10^5$	$8,7 \cdot 10^3$
595	$2,3 \cdot 10^4$	$9,7 \cdot 10^3$
905	$6,4 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$
1061,2	$2,8 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^4$
1668	$3,1 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$
2026	$3,1 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^3$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проведенного моделирования импедансов связи устройств, формирующих вакуумную камеру коллайдера, является предварительная оценка его полного импеданса и вклада в общий бюджет импедансов. Это явилось основанием для уточнения конструкции некоторых устройств. По мере внесения требуемых корректирующих изменений конструкции работа по моделированию будет продолжена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CST Particle Studio. <http://www.cst.com/Content/Products/PS/Overview.aspx>.
2. *Metral E. et al.* Beam Instabilities in Hadron Synchrotrons // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2016. V. 63, No. 2. P. 1001.
3. *Biancacci N., Salvant B., Zannini C.* Building the Impedance Model of a Real Machine // Intern. Committee for Future Accelerators. Beam Dynamics Newslett. 2016. No. 69. P. 97.
4. *Biancacci N. et al.* Impedance Model of a Machine and Associated Challenges. <http://impedance.web.cern.ch/impedance/>.
5. Технический проект ускорительного комплекса NICA. Дубна, 2015.
6. *Mounet N.* The LHC Transverse Coupled Bunch Instability. EPFL. PhD Thesis 5305. 2012.
7. *Zannini C.* Electromagnetic Simulation of CERN Accelerator Components and Experimental Applications. PhD Thesis. CERN-THESIS-2013-076. Geneva: CERN, 2013.
8. *Zannini C., Li K., Rumolo G.* Effects of an Asymmetric Chamber on the Beam Coupling Impedance // Proc. of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, 2012. WEP073.