

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 621.384.63

МИНИМИЗАЦИЯ ИМПЕДАНСА КОЛЬЦА КОЛЛАЙДЕРА NICA

© 2022 г. С. А. Мельников^a, *, И. Н. Мешков^a

^aЛаборатория физики высоких энергий, Объединенный институт
ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

*E-mail: smelnikov@jinr.ru

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 19.07.2021 г.

В ходе данной работы приводятся результаты численного моделирования значений импеданса элементов колец коллайдера NICA с целью их минимизации до значений, обеспечивающих устойчивость пучка. Для этого вносятся изменения в конструкцию элементов — дополнительные экраны, устранение резонирующих полостей и т.д. На основе численного моделирования проведены аналитические расчеты области устойчивости динамики пучка.

Ключевые слова: коллайдер, динамика частиц, импеданс, экранировка, резонансы

DOI: 10.56304/S2079562922010286

ВВЕДЕНИЕ

В ОИЯИ разрабатывается проект ускорительного комплекса Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA). Ионный коллайдер, который является основной его частью, позволит изучать процессы столкновения ионов золота с энергией до 4.5 ГэВ/н ($4 \leq \sqrt{s} \leq 11$ ГэВ/н) и поляризованных протонов с энергией до 12.6 ГэВ ($\sqrt{s} \leq 27$ ГэВ). Одним из критериев, определяющих устойчивость движения заряженных частиц внутри пучковой камеры, является величина ее импеданса, что наиболее важно для пучков высокой интенсивности. Продольный и поперечный импедансы могут возбуждать неустойчивости движения частиц пучка в Коллайдере. Кроме того, действительная часть продольного импеданса определяет вклад в рост диссипации энергии в стенках вакуумной камеры, что при высокоинтенсивном пучке может стать причиной значительного нагрева отдельных элементов сверхпроводящего Коллайдера.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА

*Импеданс пространственного заряда
и импеданс стенок*

В случае постоянного поперечного сечения камеры и идеально проводящих стенок импеданс связи отсутствует. В этом случае доминирующим является режим импеданса пространственного заряда (Space-charge impedance). Для эллиптической камеры, у которой размер малой полуоси b

значительно меньше главной полуоси, импеданс описывается формулой

$$\frac{Z_n}{n} \approx i \operatorname{sign}(n) \frac{Z_0}{\beta \gamma^2} \ln \left(\frac{1.86b}{\sigma_b} \right), \quad (1)$$

где $n \ll 2\pi R_0 \gamma / b$ — гармоника частоты обращения, R_0 — средний радиус кольца, γ — релятивистский фактор, $Z_0 = 377$ Ом, σ_b — поперечный размер пучка.

В случае конечной проводимости стенок камеры ее импеданс (Resistive wall impedance) равняется

$$\frac{Z_n}{n} = (1 - i \operatorname{sign}(\omega_n)) \frac{Z_0 \beta c}{2b \sqrt{2\pi \sigma \omega_n}} F_L, \quad (2)$$

где F_L — форм-фактор: $F_L = 0.98$ для $a/b = 0.71$, σ — проводимость материала камеры.

Импеданс связи

Взаимодействие пучка заряженных частиц с пучковой камерой ускорителя приводит к возникновению индуцированных в камере электромагнитных полей (wake-fields) и их обратному воздействию на пучок, приводящему к когерентным неустойчивостям в продольном и поперечном направлениях. По определению величина $W_{\parallel}(r_1, s) = (q_1)^{-1} \int E(r_1, z, t)_{t=(s+z)/c} dz$ называется продольным Wake-потенциалом. Поперечную его компоненту можно найти согласно теореме Пановского—Венцеля: $W_{\perp}(r_1, s) = -\nabla_{\perp} \int W_{\parallel}(r_1, s) ds$. Импеданс связи есть Фурье-образ Wake-потенциала

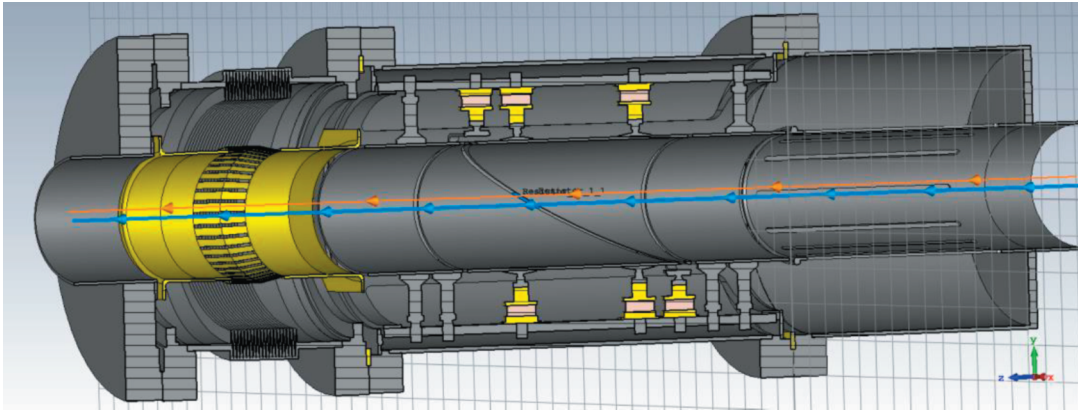


Рис. 1. 3D-модель BPM станции, используемая для моделирования.

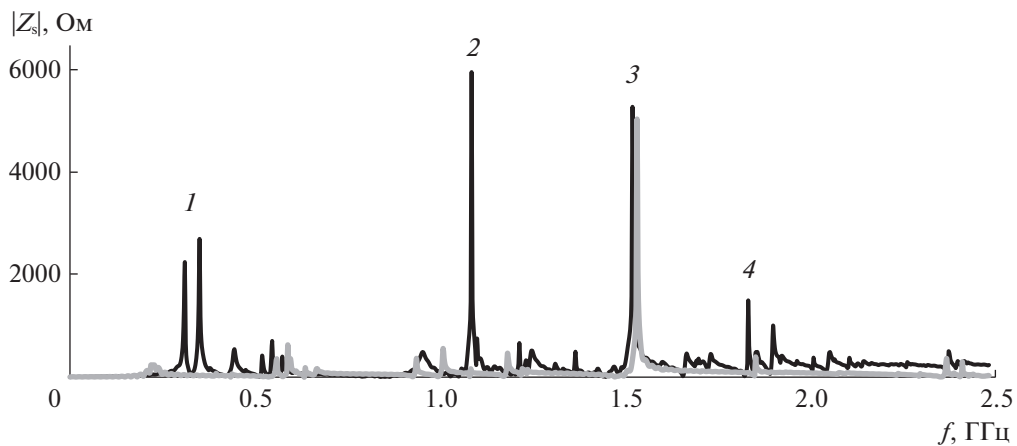


Рис. 2. Продольный импеданс для исходной модели (чёрная кривая) и экранированной (серая).

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

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

где $\lambda(s)$ — нормированное на q_1 распределение заряда.

КОНСТРУКЦИЯ BPM И РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ

Измерительные электроды мониторов положения пучка, так называемых Pick-up станции или Beam Position Monitor (BPM), расположенной в арках кольца коллайдера, имеют эллиптическое сечение и отделены друг от друга диаго-

нальным разрезом (рис. 1). Измерительные электроды отделены от остальной пучковой камеры охранными электродами, находящимися под потенциалом земли и также имеющими эллиптическое сечение. Каждая BPM-станция расположена в общей вакуумной камере вместе с камерой откачки и сильфоном механической развязки. Всего на кольце имеется 46 BPM станций: по 23 горизонтальных и вертикальных.

Для численного моделирования BPM станции была создана 3D-модель, с упрощенной геометрией (рис. 1). Моделирование производилось в программе CST-Studio (рис. 2) для энергии ионов 3 ГэВ/н.

Резонансы под номером 1 (чёрная кривая) возбуждаются зазорами между торцом пучковой камеры сильфона и охранным электродом и между торцом сильфона пучковой камеры и фланцем, резонанс под номером 2 — зазорами между измерительным и охранным электродами, резонанс под номером 3 — диагональным разрезом в измерительном электроде, резонанс под номером 4 — зазором между торцом пучковой камеры в от-

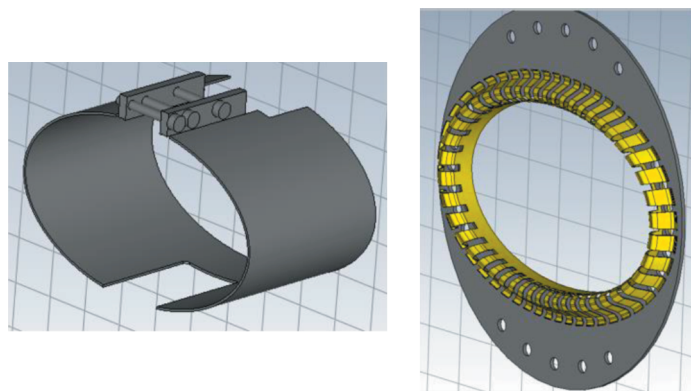


Рис. 3. Экранирующие накладки (слева) и экранирующие пружинки (справа).

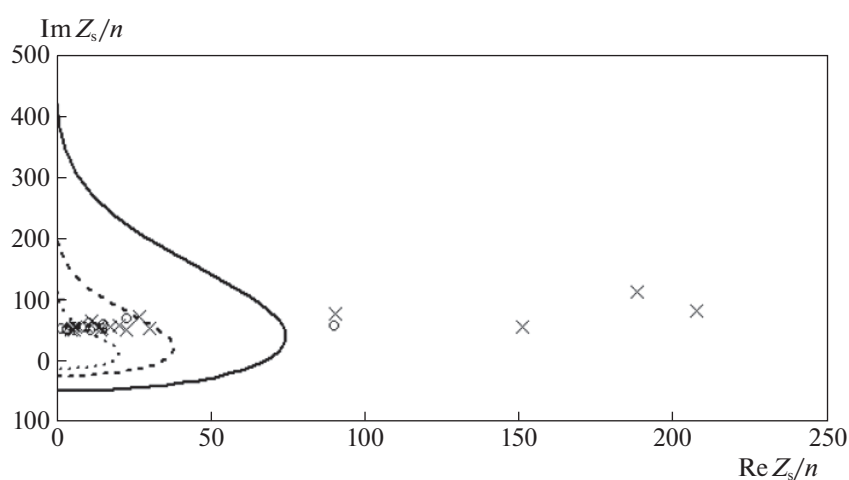


Рис. 4. Линии — границы устойчивого движения для разных значений энергии иона: сплошная — 2.5 ГэВ/н, штрихованная — 3 ГэВ/н, точечная — 4.5 ГэВ/н. Точками обозначены амплитуды резонансов импеданса, деленные на номер гармоники: исходная конструкция — $\times$, оптимизированная — $\circ$.

качном узле и охранным электродом. Исходя из результатов моделирования были внесены следующие изменения в конструкцию (рис. 3):

- добавлены экранирующие накладки между охранным и измерительным электродами,

- добавлены торцевые экраны на измерительный электрод в виде медных пружин.

В результате экранировки удалось подавить резонансы под номером 1, 2 и 4. В табл. 1 приведены значения резонансов для исходной и экра-

Таблица 1. Значения резонансов деленные на номер гармоники

Исходная модель			Экранированная модель		
f , ГГц	номер гармоники, n	$ Z /n$, Ом	f , ГГц	номер гармоники, n	$ Z /n$, Ом
0.31027	538	4.12	1.532	—	1.8
0.35011	607	4.45		—	
1.0851	1882	3.16		—	
1.5196	2636	1.98		2651	
1.8325	3178	0.464		—	
1.8994	3294	0.3		—	

нированной модели, деленные на номер гармоники частоты обращения n ($f_0 \approx 0.579$ МГц).

ИНТЕРВАЛ УСТОЙЧИВОГО ДВИЖЕНИЯ

Используя результаты ускорительной школы [2], была получена функция, определяющая границы области устойчивого продольного движения пучка в координатах $\text{Re}Z_s$, $\text{Im}Z_s$, для распущенного пучка (рис. 4). Действительные и мнимые значения импедансов моделируемых элементов накладываются на этот график, умноженные на общее число элементов в кольце, и добавляются к импедансу пространственного заряда и импедансу стенок камеры. Если точка находится внутри области, то движение стабильно. С учетом полу-

ченных результатов моделирования имеем картину влияния импедансов на стабильность пучка для изначального и экранированного варианта ВРМ станции (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка ВЧ-экранов позволила значительно снизить влияние ВРМ станции на продольную устойчивость движения пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Kekelidze D. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52 (8). P. 211. <https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16211-2>
2. *Laclare J.L.* // Proc. CERN Accelerator School: Course on General Accelerator Physics. 1992. P. 349–384.

Minimization of Impedance of the NICA Collider Ring

S. A. Mel'nikov^{1, *} and I. N. Meshkov¹

¹Laboratory of High-Energy Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

*e-mail: smelnikov@jinr.ru

Received June 28, 2021; revised July 9, 2021; accepted July 19, 2021

Abstract—Impedances of the NICA collider ring elements have been simulated to minimize them to the values ensuring beam stability. To this end, the structure of the elements is changed by installing additional shields, removing resonating cavities, etc. On the basis of the numerical simulation, analytical calculations are performed for the region of stability of beam dynamics.

Keywords: collider, particle dynamics, impedance, shielding, resonances