

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА ИМПЕДАНСА СВЯЗИ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОГО ТРАКТА BeamImpedance2Dx

© 2023 г. В. И. Каминский¹, *, С. В. Мациевский¹, *, В. И. Рашиков¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: MatsievskiySV@gmail.com

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

При разработке источников синхротронного излучения большое внимание уделяется исследованию нестабильностей пучка, ограничивающих его эмиттанс и время жизни. Одним из источников нестабильностей является возбуждение электромагнитных полей пучком в неоднородностях вакуумной камеры. Количественной характеристикой взаимодействия пучка с камерой является импеданс связи. В данной статье описано проведенное обновление программы BeamImpedance2D, ускоряющее расчет резистивного импеданса камеры за счет использования комплексного представления чисел и распределения расчетов между машинами вычислительного кластера. Приводится результат расчета импедансов реальной геометрии вакуумной камеры и ее аппроксимации.

Ключевые слова: импеданс связи, наведенные потенциалы, накопительное кольцо

DOI: 10.56304/S2079562922050207

1. КОДЫ РАСЧЕТА ИМПЕДАНСОВ ВАКУУМНЫХ КАМЕР

1.1. WakeImpedance2D

Математическому моделированию взаимодействия ускоренного пучка с вакуумной камерой и расчетам соответствующих импедансов связи уделяется значительное внимание во многих исследовательских центрах, поскольку этими параметрами определяется эмиттанс и время жизни пучка. Одним из эффективных инструментов расчета импеданса связи является набор программ ImpedanceWake2D (IW2D) [1]. Этот набор содержит в себе четыре программы для расчета продольных и поперечных импедансов связи и наведенных потенциалов в многослойных аксиально-симметричных или плоских структурах. Теория, стоящая за этими программами, описана в статье [2]. IW2D можно также использовать для расчета импеданса эллиптических камер при помощи поправочных коэффициентов, также упоминающихся в литературе под названием Якоуа форм-факторов [3]. Количество слоев, составляющих стенку камеры, может быть любым при условии линейности параметров материалов в каждом слое. Последний слой стенки имеет бесконечную толщину: бесконечно проводящий слой не добавляется. Программы IW2D используют аналитические выражения электромагнитных полей, создаваемых точечным пучком,двигающимся с заданной скоростью.

1.2. BeamImpedance2D

Программа BeamImpedance2D (BI2D) рассчитывает распределение электрического поля в двухмерных структурах любой конфигурации численно [4]. Код использует метод конечных элементов на треугольной сетке. Типичные расчетная сетка и рассчитанное распределение одной из компонент электрического поля представлены на рис. 1.

Оригинальный код BI2D использует устаревшую версию библиотеки FEniCS [5]. Эта версия библиотеки не поддерживала использование комплексных чисел, из-за чего потребовалось дополнительно разделять выражения на действительную и мнимую составляющие. Программа была полностью переписана с использованием обновленной библиотеки FEniCSx и распространяется под названием BeamImpedance2Dx (BI2Dx) [6].

BI2Dx позволяет использовать действительную или комплексную слабые формулировки расчетных уравнений и использует MPI [7] для параллелизации расчетов. Выведенная комплексная форма слабой формулировки электромагнитной задачи содержит в себе примерно в четыре раза меньше слагаемых по сравнению с вариантом с действительными числами. Расчет выражений в этой форме происходит примерно в два раза быстрее. Выражение (1) соответствует выражению (19) из статьи [4]

$$\varepsilon\beta c_0 \int_{\Omega} \nabla_{\perp} \mathbf{v} \cdot \nabla_{\perp} \Phi d\Omega + \frac{\omega^2 \varepsilon}{\beta c_0} \int_{\Omega} \mathbf{v} \Phi d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v} J_s d\Omega; \quad (1)$$

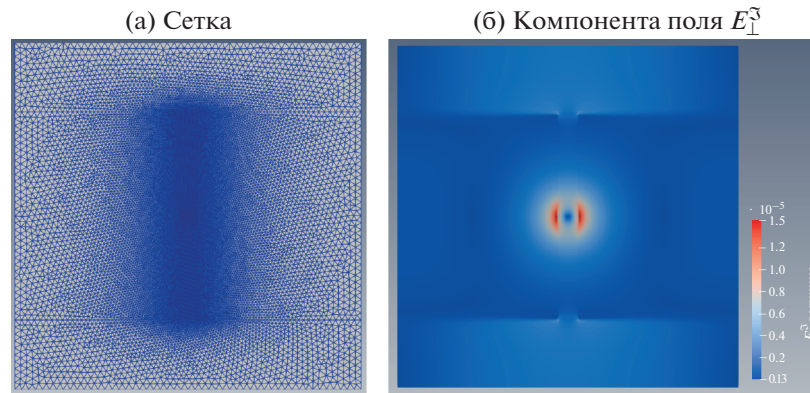


Рис. 1. Электрическое поле, рассчитанное в программе BI2Dx.

матрица (2) и выражения (3)–(5) комплексной формы соответствуют выражениям (38)–(44).

$$\left[\begin{pmatrix} S_{\perp\perp} & S_{\perp z} \\ S_{z\perp} & S_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{\perp} & 0 \\ 0 & M_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{\perp\perp} & 0 \\ B_{z\perp} & B_{zz} \end{pmatrix} \right] E_{\text{curl}} = R, \quad (2)$$

$$S_{\perp\perp} = \int_{\Omega} (\hat{\mathbf{B}} \mathbf{w}) \left(\frac{1}{\mu} \hat{\mathbf{B}} \mathbf{E}_{\perp} \right) d\Omega + \frac{\omega^2}{\beta^2 c_0^2} \int_{\Omega} \mathbf{w} \frac{1}{\mu} \mathbf{E}_{\perp} d\Omega, \quad (3)$$

$$M_{\perp} - \omega^2 \int_{\Omega} \mathbf{w} \mathbf{E}_{\perp} d\Omega, \quad (4)$$

$$B_{\perp\perp} = \int_{\partial\Omega} \mathbf{w} \left(\frac{1}{\mu} \hat{\mathbf{B}} \mathbf{E}_{\perp} \right) \bar{\tau} dS. \quad (5)$$

В репозитории программы BI2Dx помимо исходного кода доступны также подробные выкладки расчетных выражений в действительной и комплексной формах, а также тестовые расчетные задачи на основе верифицированных данных из статьи [4].

2. ИМПЕДАНСЫ ВАКУУМНЫХ КАМЕР

В работе было проведено исследование идеализированных вакуумных камер (рис. 2, 3) и возможность их использования для аппроксимации геометрии реальных камер (рис. 4). Для этого первоначально было проведено сравнение результатов расчетов таких камер при помощи программ BI2Dx и IW2D.

2.1. Камера круглого сечения

На рис. 2 изображены расчетные модели камер с круглым сечением. Модели (рис. 2а, 2б) были использованы при расчетах дипольных и монополюсных импедансов на низкой частоте соответственно. Модель (рис. 2в) была использована при расчетах на высоких частотах.

Это разделение связано с используемым граничным условием: на частотах, при которых тол-

щина материала была меньше толщины скин-слоя, расчет производился путем решения уравнений Максвелла внутри материала; на частотах, при которых толщина скин-слоя оказывался меньше толщины слоя материала, для расчета использовалось граничное условие проводящей стенки SIBC.

Действительные и мнимые части монополюсного импеданса представлены на рис. 5, 6.

Как видно из представленных зависимостей, результаты расчетов совпали с хорошей степенью точности.

2.2. Камера эллиптического сечения

На рис. 3 изображены расчетные модели камер с эллиптическим сечением. Модели (рис. 3а, 3б) были использованы при расчетах дипольных и монополюсных импедансов на низкой частоте соответственно. Модель (рис. 3в) была использована при расчетах на высоких частотах.

Действительные и мнимые части монополюсного и дипольного импеданса по двум осям, рассчитанные при помощи BI2Dx и IW2D, представлены на рис. 7–9. Дипольные импедансы IW2D были получены путем расчета импеданса камеры круглого сечения с радиусом, равным размеру малой полуоси эллипса, домноженного на $Y_{\text{акоуа}}$ форм-фактор.

Как видно из представленных зависимостей, результаты расчетов совпали с хорошей степенью точности.

2.3. Реальная камера

На рис. 4 изображено сечение камеры накопительного кольца синхротрона [8]. Красным цветом обозначен эллипс аппроксимирующей эллиптической камеры.

На рис. 10 изображено распределение одной из компонент электрического поля, возбужден-

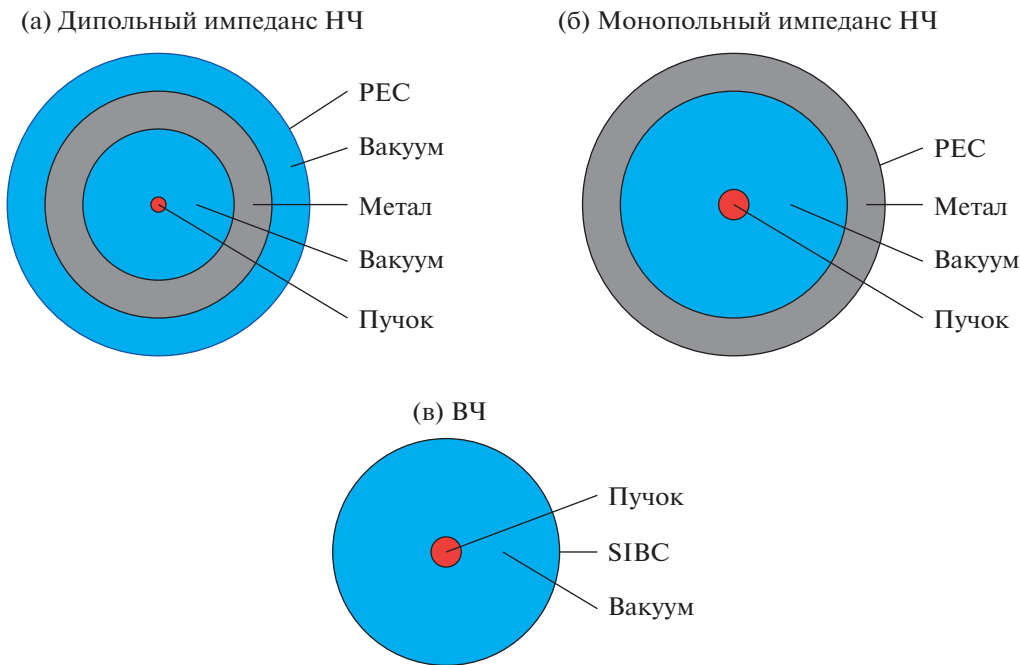


Рис. 2. Расчетные модели камеры круглого сечения программы BI2Dx (не в масштабе).

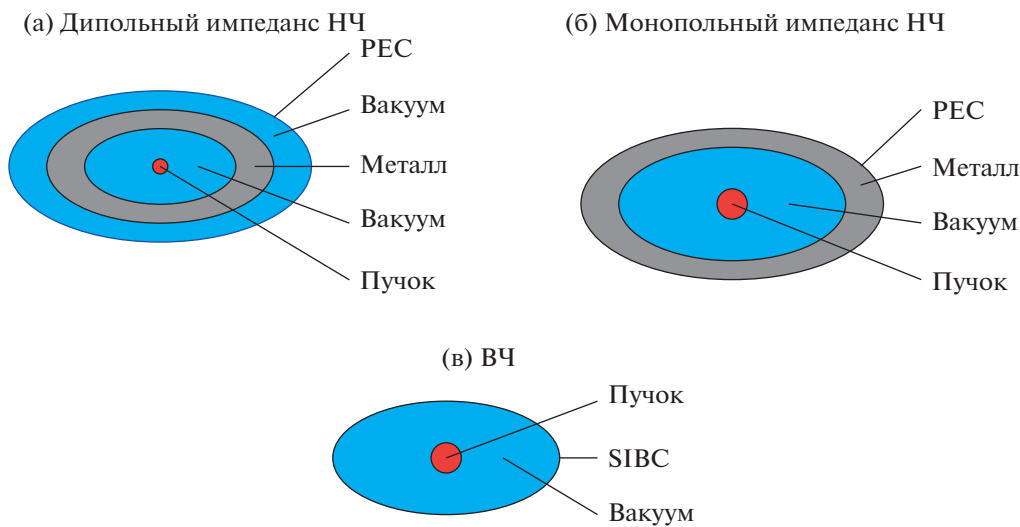


Рис. 3. Расчетные модели камеры эллиптического сечения программы BI2Dx (не в масштабе).

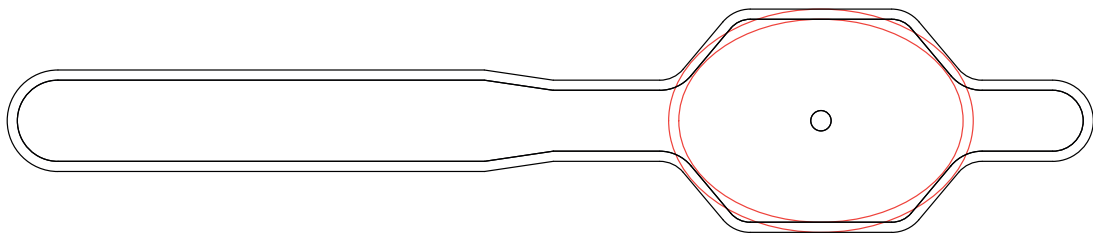


Рис. 4. Реальная камера (красным цветом обозначен эллипс, аппроксимирующий сечение камеры).

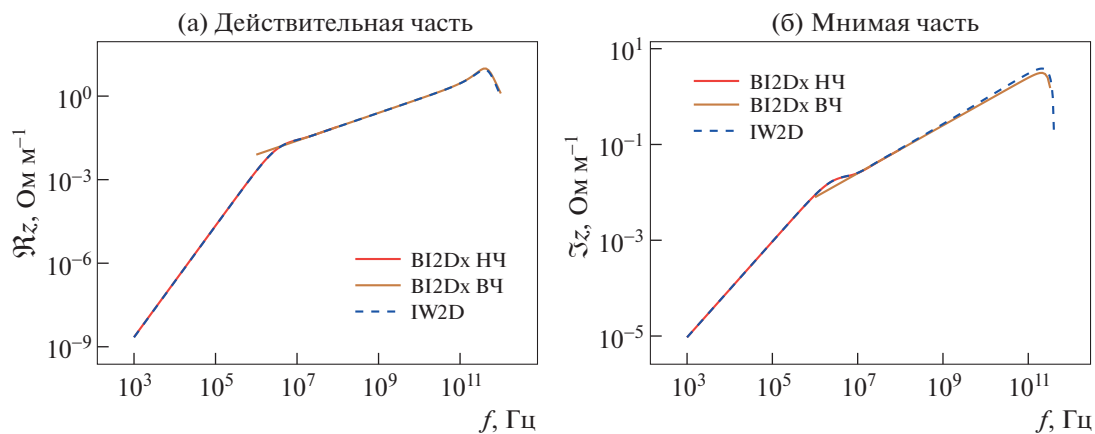


Рис. 5. Монопольные импедансы камеры круглого сечения.

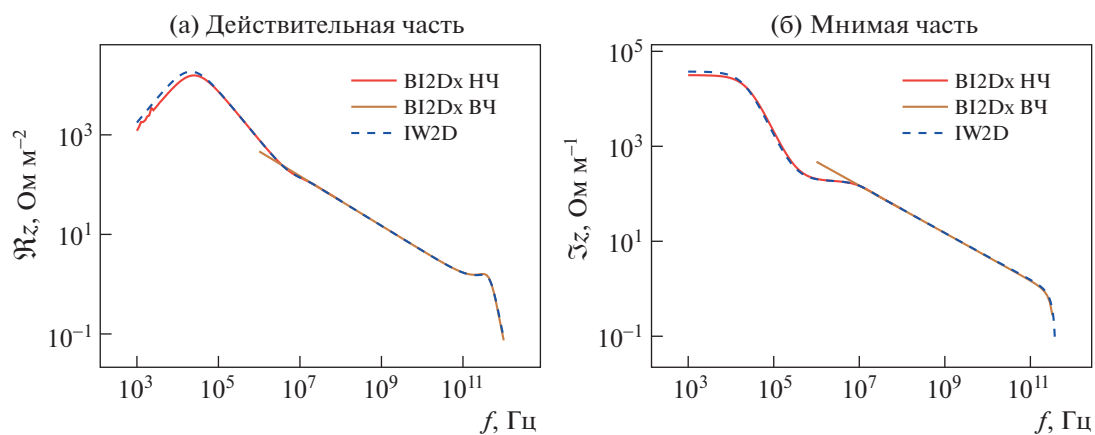


Рис. 6. Дипольные импедансы камеры круглого сечения.

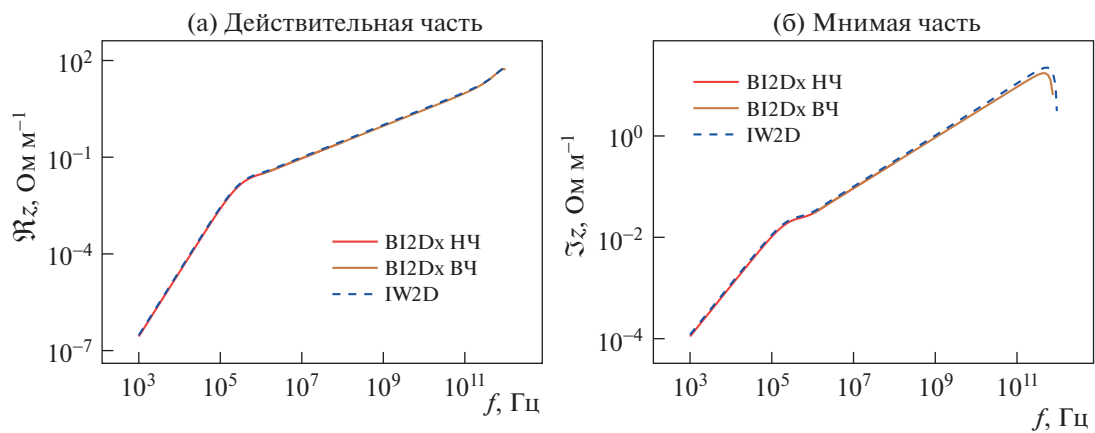


Рис. 7. Монопольные импедансы камеры эллиптического сечения.

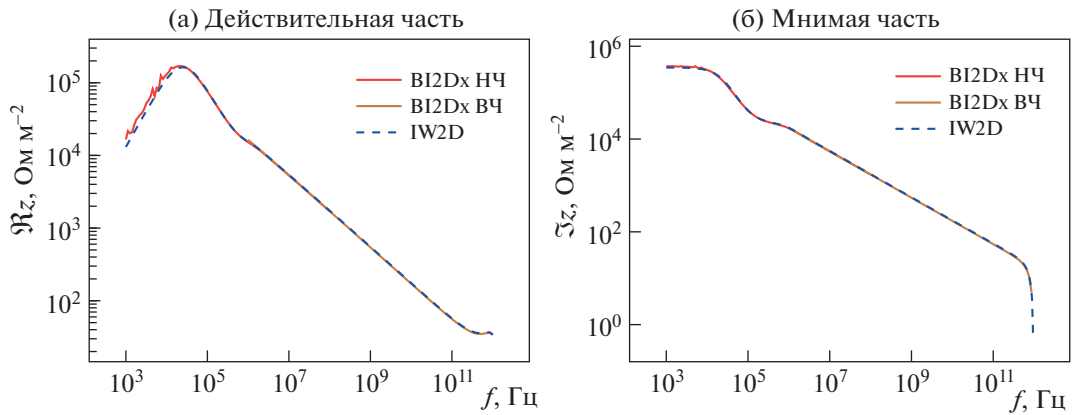


Рис. 8. Дипольные импедансы по оси X камеры круглого сечения.

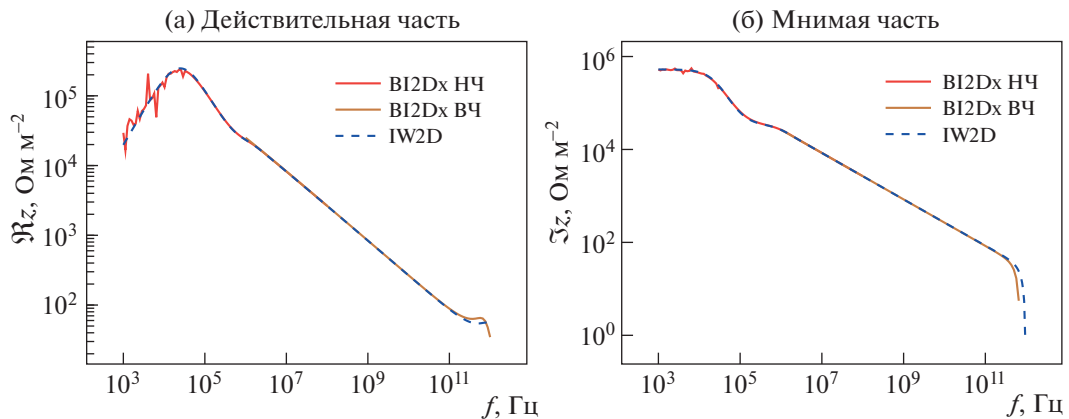


Рис. 9. Дипольные импедансы по оси Y камеры круглого сечения.

ного дипольным источником, рассчитанное в программе BI2Dx.

При расчетах реальной камеры использовались модели, аналогичные описанным в параграфах ПА и ПВ.

Действительные и мнимые части монопольного и дипольного импеданса по двум осям реальной и аппроксимирующей камер, рассчитанные при помощи программ BI2Dx и IW2D, изображены на рис. 11–13. Дипольные импедансы IW2D были получены методом, описанным в параграфе ПВ.

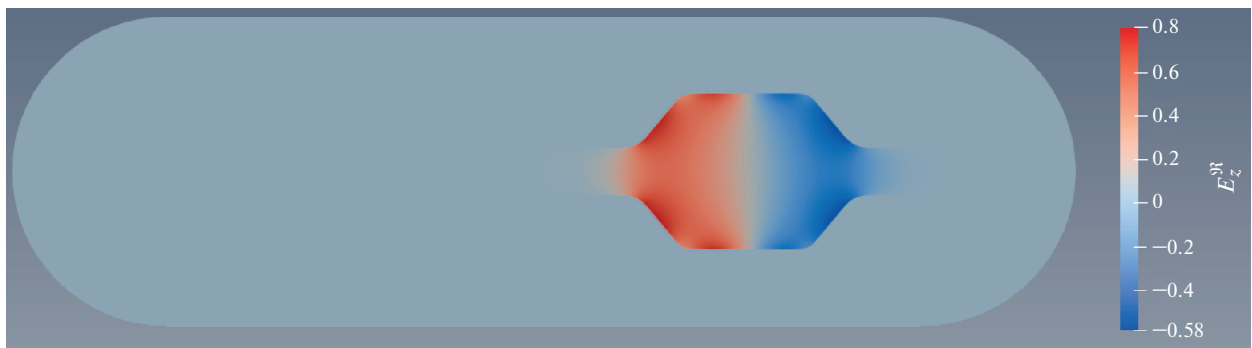


Рис. 10. Распределение компоненты электрического поля E_z^R в вакуумной камере, возбужденного дипольным источником.

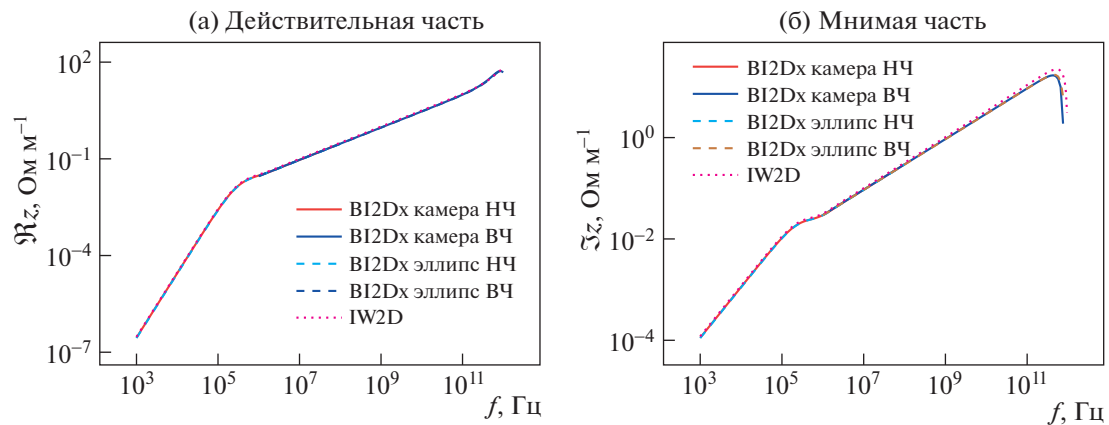
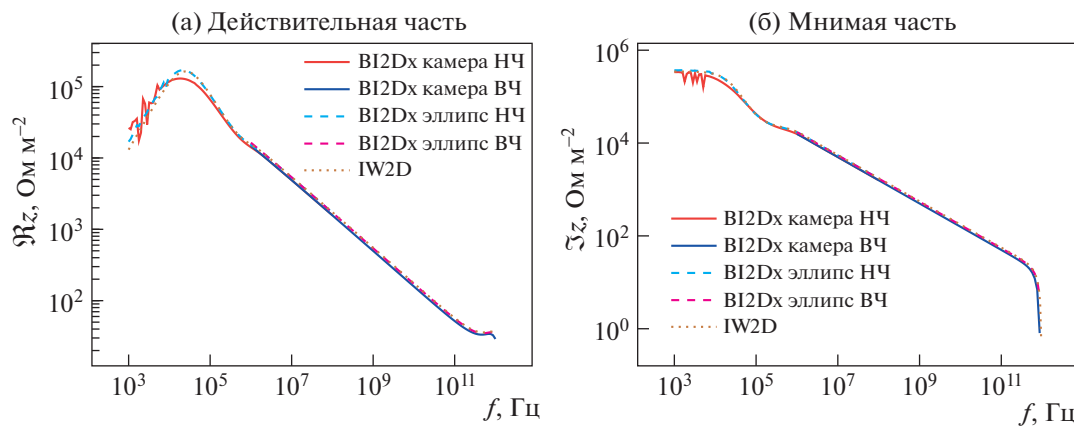
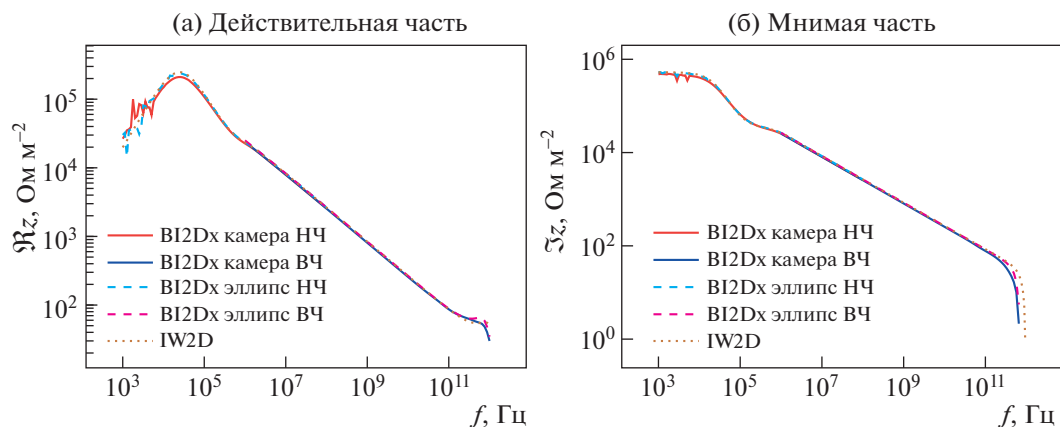


Рис. 11. Монопольный импеданс реальной и аппроксимирующей камер.

Рис. 12. Дипольный импеданс по оси X реальной и аппроксимирующей камер.

Как видно из представленных зависимостей, рассчитанные импедансы для реальной и идеализированной камер различаются по горизонталь-

ной оси в области низких частот (рис. 12а), и практически одинаковы по вертикальной оси (рис. 13а). Этот результат является ожидаемым, по-

Рис. 13. Дипольный импеданс по оси Y реальной и аппроксимирующей камер.

сколькx аппроксимирующий эллипс лучше описывает геометрию камеры по вертикальной оси, чем по горизонтальной.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было проведено сравнение результатов расчетов характеристик вакуумных камер круглого и эллиптического сечения программами BI2Dx и IW2D. Результаты этих расчетов совпали с хорошей степенью точности. После верификации программ исследовалась возможность использования эллиптической камеры для аппроксимации геометрии реальной камеры накопительного кольца синхротрона. Несмотря на некоторое различие результатов расчетов для дипольных импедансов по горизонтальной оси, такая аппроксимация хорошо описывает характеристики вакуумной камеры и может быть использована для дальнейших расчетов импедансов вакуумных камер широкого класса ускорителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Mounet N., Biancacci N., Amorim D. Impedance-Wake2D: Beam Impedance Calculation Program. 2021. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/ABPComputing/ImpedanceWake20>
2. Mounet N. and Métral E. // Proc. 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams. 2010. P. 353.
3. Migliorati M., Palumbo L., Zannini C., Biancacci N., Vaccaro V.G. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. P. 121001.
4. Niedermayer U., Boine-Frankenheim O., De Gersem H. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2015. V. 18 (3). P. 032001.
5. Alnaes M. et al. // Arch. Numer. Software. 2015. V. 3 (100). P. 9.
6. Matsievskiy S. BeamImpedance2Dx: Beam Impedance Calculation Library. 2021. <https://gitlab.com/matsievskiysv/bi2d>.
7. Open MPI: Open Source High Performance Computing. 2021. <https://www.open-mpi.org/>
8. White S. // Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17). Geneva, Switzerland, 2017. JACoW. 2017. No. 8. P. 3063. <https://jacow.org/ipac2017/papers/wepiko58.pdf>

Modernized Program for the Vacuum Chamber Coupling Impedance Calculation BeamImpedance2Dx

V. I. Kaminskii¹, S. V. Matsievskiy¹, *, and V. I. Rashikov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia
*e-mail: MatsievskiySV@gmail.com

Received July 20, 2022; revised July 20, 2022; accepted July 20, 2022

Abstract—During synchrotron source development much attention is devoted to beam instability, which limits beam emittance and lifetime. One of the sources of beam instability is the electromagnetic field excitation in the vacuum chamber heterogeneous regions. The quantitative characteristic of the beam-chamber interaction is the coupling impedance. This paper describes modernization of the program BeamImpedance2D, which accelerates resistive impedance calculations by unitizing complex equation forms and distributed calculations among the computation cluster nodes. Comparison between calculations of the real vacuum chamber and its approximation are presented.

Keywords: coupling impedance, induced potentials, storage ring