

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ “СИЛА”

© 2023 г. С. В. Мациевский^а, В. И. Рашиков^а, *

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: VIRashchikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 29.07.2022 г.

Принята к публикации 31.07.2022 г.

Исследуются коллективные эффекты в проектируемом в настоящее время источнике синхротронного излучения четвертого поколения “СИЛА”. В процессе взаимодействия заряженных частиц с элементами вакуумной камеры накопителя пучок наводит поля, которые могут приводить к неустойчивостям, ограничивающим либо заряд в сгустке (односгустковые неустойчивости), либо суммарный ток накапливаемого пучка (многосгустковые неустойчивости). Проведена оценка порогов возникновения односгустковых неустойчивостей в накопительном кольце.

Ключевые слова: источник синхротронного излучения, коллайдер, неустойчивости пучка, микро-волновая неустойчивость, эмиттанс, импеданс, моделирование

DOI: 10.56304/S2079562922050311

ВВЕДЕНИЕ

В рамках программы развития синхротронных и нейтронных исследований в России ведется разработка проекта источника синхротронного излучения четвертого поколения с энергией 6 ГэВ, эмиттансом электронного пучка 70 пм и током пучка 0.2 А. Получение пучков с такими характеристиками требуют проведения детального анализа динамики пучка.

Основное внимание при моделировании динамики уделялось расчету наведенных полей (wake-полей в иностранной литературе), возникающих при взаимодействии пучка с элементами вакуумной камеры накопителя. Эти поля являются главной причиной возникновения неустойчивостей пучка, препятствующих получению малых значений эмиттанса и энергетического спектра, характерных для источников синхротронного излучения четвертого поколения. Особенно сильное их влияние проявляется в режиме ускорения малого числа сгустков с большим зарядом (timing mode), когда заполнена лишь часть сепаратрисс на орбите накопительного кольца.

Исследование неустойчивостей практически невозможно проводить без компьютерного моделирования. Поэтому в начале работы был создан сайт [1], на котором размещены необходимые для расчета программы. Они были протестированы перекрестным образом на предмет совпадения получаемых результатов и оценки времени счета. Их можно разделить на две группы:

- коды для расчета наведенных полей - Echo [2], GdfidL [3], ABCI [4], CST [5], IW2D [6], BI2D [7];
- коды для исследования неустойчивостей с учетом этих полей Elegant [8], SBSC [9], AT2.0 [10], PyHEADTAIL [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Одним из основных видов неустойчивостей в таких установках является так называемая микро-волновая неустойчивость, которая связана с возмущением продольного движения частиц сгустка. Для ее расчета необходимо построить импедансную модель установки, в которой бы были учтены наведенные сгустком поля во всех элементах вакуумной камеры накопительного кольца. Поскольку частотный диапазон и разрабатываемая структура проектируемого источника синхротронного излучения во многом идентична накопителю ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), то на первом этапе расчетов в качестве импедансной модели использовалась масштабированная импедансная модель ESRF-EBS. Компоненты продольного и поперечного наведенных полей ESRF-EBS представлены на рис. 1 [12]. При расчетах учитывалось суммарное (геометрическое и резистивное) наведенное сгустком поле.

Результаты расчета продольной динамики сгустка показали [13], что в нашей установке величина порога микроволновой неустойчивости (начало роста разброса по энергии в сгустке при

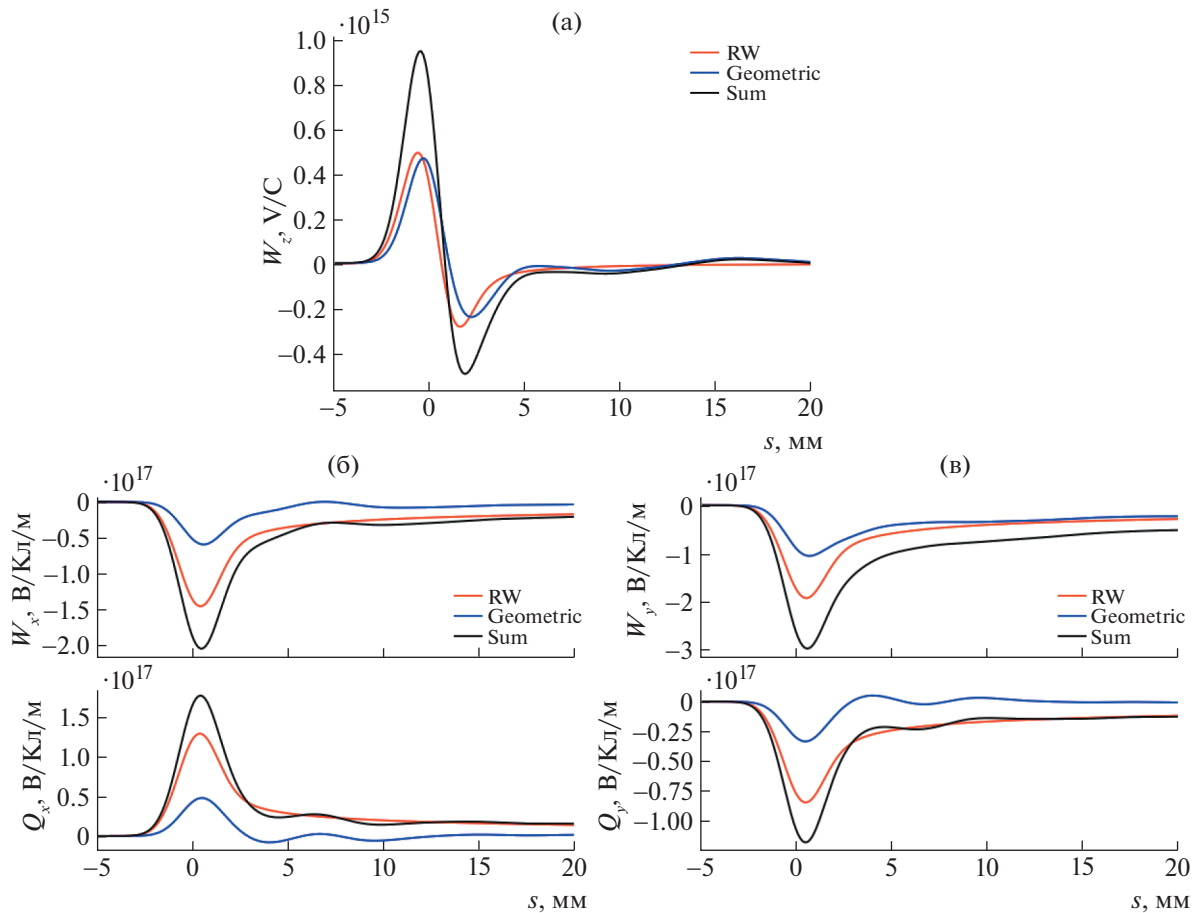


Рис. 1. Продольная (а), горизонтальная (б) и вертикальная (в) дипольные и квадрупольные компоненты наведенного сгустком поля.

продолжающемся росте длины сгустка — рис. 2) оказалась, как и ожидалось, в 3–4 раза меньше, чем в ESRF, что и следовало из аналитических оценок по критерию Буссарда [14]. В нашем случае коэффициент расширения орбит, разброс по энергии и продольный размер сгустка оказываются меньше, а радиус кольца больше, чем в ESRF при постоянной величине эффективного импеданса, что позволяет сделать предварительный вывод о том, что в нашей установке микроволновая неустойчивость будет развиваться при меньших токах пучка.

Поскольку плотность заряда в сгустке велика, необходимо оценить влияние внутрипучкового рассеяния, которое может существенно повлиять на его параметры. Такое исследование было проведено с использованием кода ELEGANT. Зависимости эмиттанса, продольного размера и энергетического разброса от тока приведены на рис. 3.

Видно, что внутрипучковое рассеяние в режиме коротких импульсов с большим зарядом существенно увеличивает как продольный размер сгустка, так и его эмиттанс и разброс по энергии, что

может не позволить достичь заявленных характеристик пучка. Связанный с внутрипучковым рассеиванием рост эмиттанса может быть частично компенсирован удлинением сгустка, например, за счет использования гармонических резонаторов.

На рис. 4 представлены зависимости эмиттанса и энергетического разброса от длины сгустка. Видно, что рост продольного размера сгустка существенно уменьшает эмиттанс и энергетический спектр сгустка.

Поперечные компоненты короткоживущего наведенного поля, представленные на рис. 1б, 1в, также накладывают ограничение на максимальный заряд в сгустке. Это так называемая поперечная неустойчивость связанных мод TMCI. В нашем кольце при нулевой хроматичности, ее порог оканчивается равным 0.4 мА в вертикальной плоскости (рис. 5)

Учет реальной хроматичности и эффекта удлинения сгустка увеличивают порог неустойчивости до 5 мА. Превышение этого значения ведет к появлению потерь в сгустке. На рис. 6 приведены изменения амплитуда колебаний центра масс

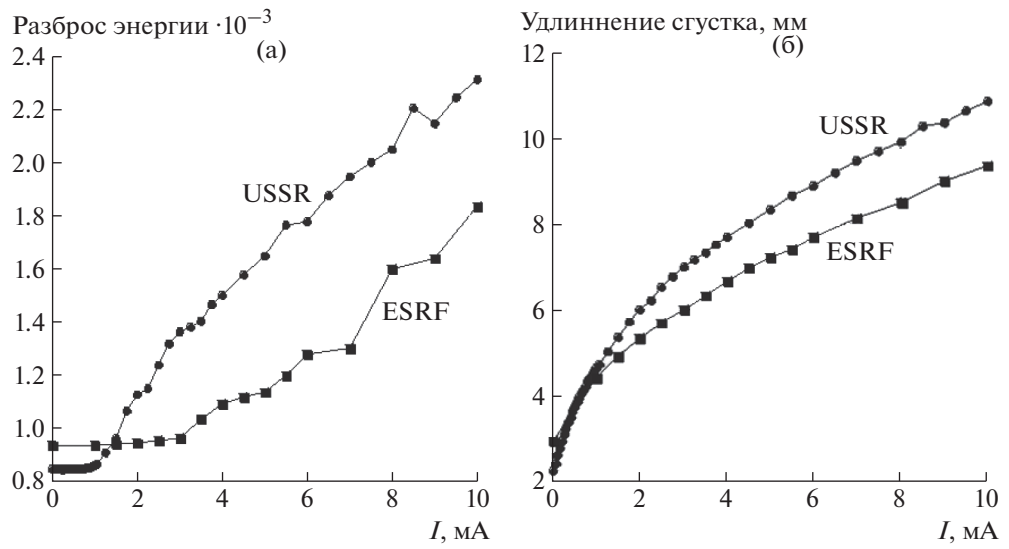


Рис. 2. Энергетический разброс (а) и удлинение сгустка (б) как функции тока пучка для накопителя СИЛА(USSR) и ESRF.

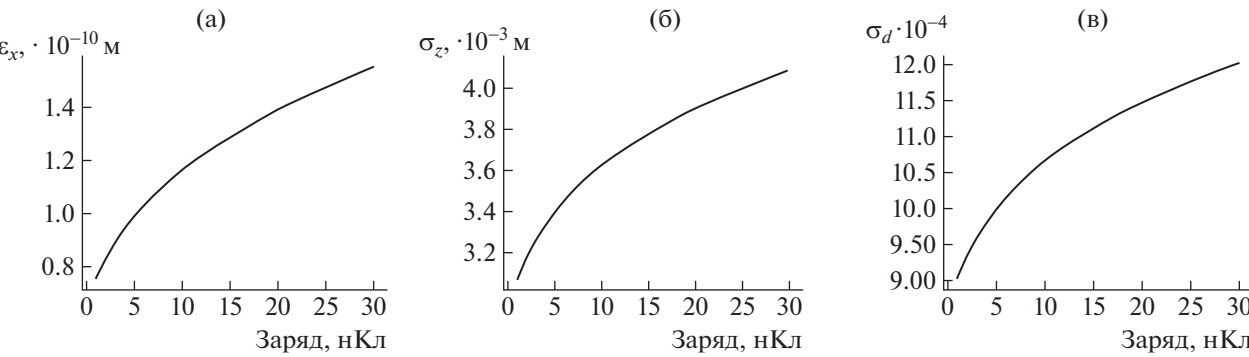


Рис. 3. Эмиттанс (а), продольный размер (б) и энергетический спектр (в) как функция заряда сгустка.

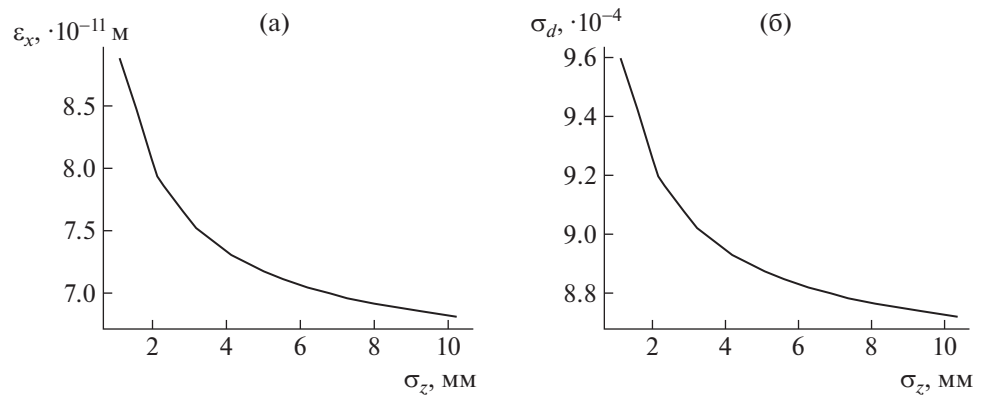


Рис. 4. Эмиттанс (а) и энергетический спектр (б) как функция длины сгустка.

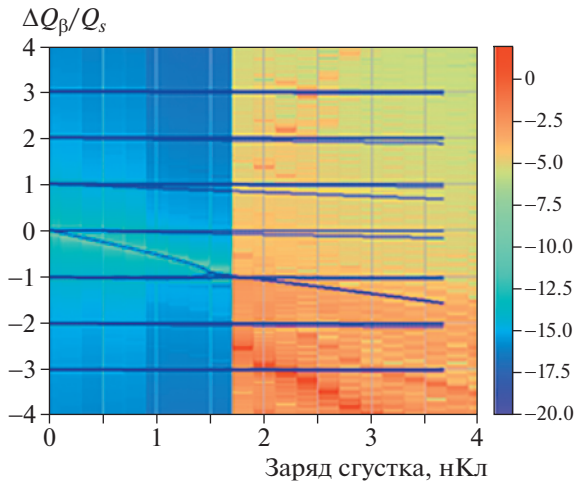


Рис. 5. Сдвиг частоты бетатронных колебаний с ростом заряда сгустка.

сгустка, его среднеквадратичного размера и потери заряда в горизонтальной и вертикальной плоскостях при токе 6 мА.

Видно, что амплитуда бетатронных колебаний и среднеквадратичный размер сгустка в вертикальной плоскости значительно больше, чем в горизонтальной, и как следствие, потери заряда происходят в вертикальной плоскости. Посколь-

ку основной вклад в вышеперечисленные явления вносит наведенное пучком поле, то подобное превалирование потерь в вертикальной плоскости вполне объяснимо. Дипольная и квадрупольная компоненты горизонтального наведенного поля имеют разные знаки (рис. 1б) и частично компенсируют друг друга, в то время как вертикальные компоненты одного знака (рис. 1в) и, следовательно, усиливают друг друга.

В ходе выполнения расчетов проведена модернизация программа BeamImpedance2D (BI2D) [15], что позволило существенно ускорить процесс расчетов резистивного импеданса вакуумной камеры накопителя. В отличие от ранее использовавшейся при расчетах резистивных импедансов программы ImpedanceWake2D [16], она позволяет рассчитывать импеданс камеры произвольного сечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан репозиторий с программами, необходимыми для проектирования накопительных колец современных источников синхротронного излучения и коллайдеров с малым эмиттансом и высокой яркостью пучка. Программы прошли перекрестное тестирование на решении конкретных задач проекта и показали хорошее согласие.

Определены пороги односгустковых неустойчивостей. Показано, что ток 5 мА в отдельном

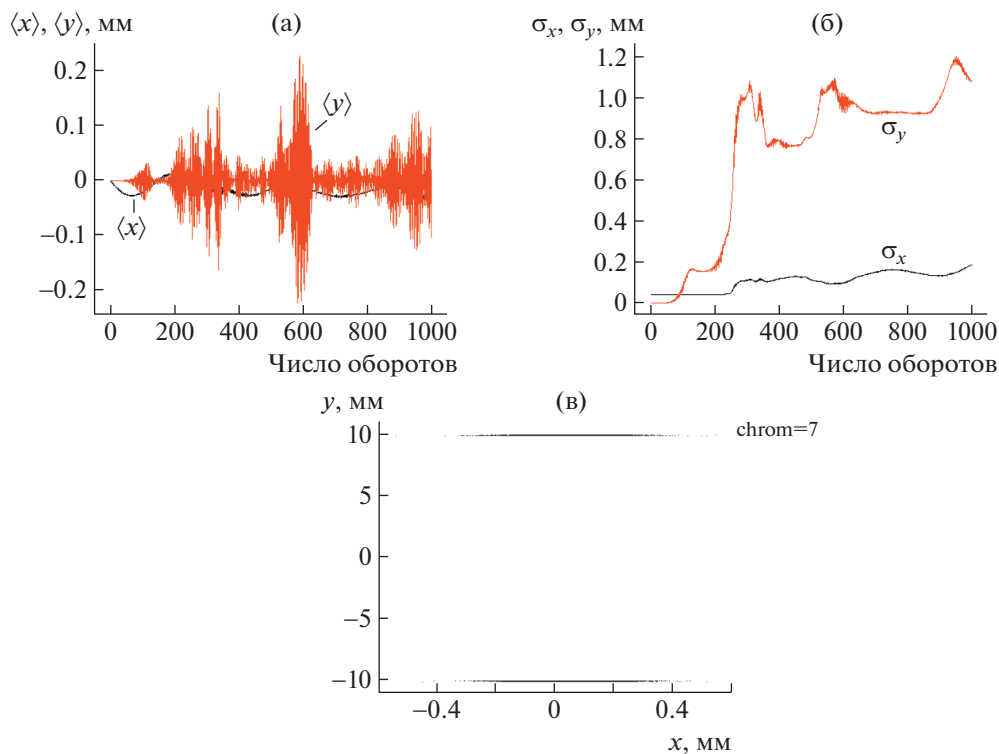


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний центра масс сгустка (а), его среднеквадратичного размера (б) и потери заряда в горизонтальной и вертикальной плоскостях (в) от числа оборотов при токе 6 мА.

сгустке и 200 мА в многосгустковом режиме может быть накоплено в кольце “СИЛА” с разработанной магнитной структурой [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Bitbucket repositories: <https://bitbucket.org/cremlin-plus-wp4-task3>
2. Code ECHO: <https://echo4d.de/>
3. W.B. Fieldcomputations. The GdfidL Electromagnetic Field Simulator: <http://www.gdfidl.de/>
4. ABCI_MP. <https://abci.kek.jp/>
5. CST Studio Suite. <https://www.3ds.com/edu/>
6. Impedance Wake 2D code for round and flat chamber: <https://gitlab.cern.ch/IRIS/IW2D/>
7. BeamImpedance2D: A tool to calculate beam coupling impedance: <https://bitbucket.org/uniederm/beam-impedance2d/>
8. Argonne National Laboratory's Advanced Photon Source: <https://ops.aps.anl.gov/cgi-bin/oag-Log4.cgi?name=elegant.2021.3.0.tar.gz>
9. Zobov M. et al. // arXiv preprint physics/0312072 [physics.acc-ph]. 2003.
10. Atcollab/at: Accelerator Toolbox: <https://github.com/atcollab/at>
11. CERN PyHEADTAIL macro-particle code: <https://github.com/PyCOMPLETE/PyHEADTAIL>
12. White S. // Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'2017). 2017.
13. Chae Y. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (1). С. 16 [Chae Y. et al. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (12). P. 1968].
14. D. Boussard // CERN-LabII-RF-INT-75-2. Preprint. 1975. P. 75.
15. Niedermayer U., Boine-Frankenheim O., H. De Gerssem H. // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2015. V. 18. P. 032001.
16. Mounet N. // ImpedanceWake2D User Manual. CERN: https://impedance.web.cern.ch/impedance/Codes/ImpedanceWake2D/user_manual_todate.txt
17. Liuzzo S.M. et al. // Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'21). 2021. P. 1466. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB049>

Studies of Collective Effects in Synchrotron Radiation Source “Sila”

S. V. Matsiyevskij¹ and V. I. Rashchikov^{1, *}

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: VIRashchikov@mephi.ru

Received July 18, 2022; revised July 29, 2022; accepted July 31, 2022

Abstract—Collective effects are studied in the fourth-generation synchrotron radiation source USSR (the SILA project) currently being designed. During the interaction of charged particles with the elements of the vacuum chamber of the storage ring, the beam induces wakefields that can lead to instabilities that limit either the charge in the bunch (single-bunch instabilities) or the total current of the accumulated beam (multi-bunch instabilities). The thresholds for the occurrence of single-bunch instabilities are evaluated.