

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 541.11

МИКРОВОЛНОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ПРОЕКТИРУЕМОМ
ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ USSR

© 2022 г. У. Чае^a, С. В. Мацевский^{b, c}, В. И. Рашиков^{b, c, *}, М. Зобов^d

^aDESY, Hamburg, 22607 Germany

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

^cНациональный исследовательский центр “Курчатowski институт”, Москва, 123182 Россия

^dLNF-INFN, Frascati, 00044 Italy

*E-mail: VIRashchikov@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 09.08.2021 г.

Исследование неустойчивостей, возникающих при взаимодействии пучка заряженных частиц с элементами камеры современных источников синхротронного излучения и коллайдеров, является необходимой задачей, поскольку получить требуемые параметры пучка в таких установках без их учета практически невозможно. Рассматриваются условия возникновения микроволновой неустойчивости в проектируемом источнике синхротронного излучения четвертого поколения USSR с энергией 6 ГэВ и эмиттансом 70 пм. Исследуются возможности уменьшения ее влияния на параметры накапливаемого в кольце пучка и, как следствие, на выходные параметры установки.

Ключевые слова: источник синхротронного излучения, коллайдер, неустойчивости пучка, микроволновая неустойчивость, эмиттанс, импеданс, моделирование

DOI: 10.56304/S2079562922010110

ВВЕДЕНИЕ

В рамках Европейского проекта CREMLIN-plus в котором участвуют Германия (Дези), Франция (Европейский Центр Синхротронного Излучения ESRF), Италия (Национальный институт ядерных исследований, Фраскати) и Россия, 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. Особое внимание следует уделить расчету наведенного поля (wake-поле 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. Особенно сильное их влияние проявляется в режиме ускорения малого числа сгустков с большим зарядом (timing mode).

Одним из основных видов неустойчивостей в таких установках является так называемая микроволновая неустойчивость, которая связана с возмущением продольного движения частиц сгустка. Для ее расчета необходима модель импе-

данса установки, в которой бы были учтены наведенные сгустком поля во всех элементах вакуумной камеры. Поскольку частотный диапазон и разрабатываемая структура во многом идентична накопителю ESRF, то на первом этапе расчетов в качестве импедансной модели использовалась масштабированная импедансная модель ESRF. Сравнение характеристик установок (табл. 1) позволяет сделать аналитические оценки порога микроволновой неустойчивости.

Согласно критерию Буссарда [1] пороговый ток определяется следующей формулой

$$I_{th} = \frac{\sqrt{2\pi}\alpha_p (E/e)(\sigma_E/E)^2 \sigma_{z0}}{R\left(\frac{Z}{n}\right)_{\text{eff}}},$$

где α_p – коэффициент расширения орбит, E – энергия пучка, σ_E – разброс по энергии, σ_{z0} – продольный размер сгустка, R – радиус кольца, $(z/n)_{\text{eff}}$ – эффективный импеданс. В нашем случае коэффициент расширения орбит, разброс по энергии и продольный размер сгустка оказываются меньше, а радиус больше, чем в ESRF при постоянной величине эффективного импеданса, что позволяет сделать предварительный вывод о том, что в нашей установке микроволновая не-

Таблица 1. Сравнение характеристик установок ESRF–EBS и USSR

Параметр	ESRF–EBS	USSR
Энергия, ГэВ	6	6
Периметр, м	843.98	1054.97
Коэффициент расширения орбит	$9 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Радиационные потери, кэВ	2536.08	2091.48
Разброс по энергии	$9.37 \cdot 10^{-4}$	$8.50 \cdot 10^{-4}$
H время затухания, обороты	3089	3772
V время затухания, обороты	4732	5738
E время затухания, обороты	3222	3880
ВЧ напряжение, МВ	6.5	5.0
ВЧ частота, МГц	352.37	352.65
Номер гармоники, n	992	1241
Синхротронная частота, Q_s	$3.68 \cdot 10^{-3}$	$2.83 \cdot 10^{-3}$
Длина сгустка, мм	2.94	2.70

устойчивость будет развиваться при меньших токах пучка. Проведенные в дальнейшем расчеты с применением кода SBSC, ранее успешно использованного для расчета продольной динамики пучка с учетом импеданса в аккумуляторном и основных кольцах коллайдера DAΦNE [2, 3], подтвердили первоначальные выводы. На рис. 1 для сравнения приведены зависимости энергетического разброса и продольной длины сгустка в зависимости от его тока в ESRF и USSR.

Видно, что в нашей установке величина порога неустойчивости (начало роста разброса по энергии в сгустке на графике) оказалась, как и ожида-

лось, в 3–4 раза меньше, чем в ESRF, что может существенно повлиять на выходные параметры пучка. Так, например, на рис. 2 видно искажение продольного фазового портрета пучка для двух различных значений тока 10 и 12 мА.

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

Видно, что внутрисгустковое 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 внутрисгустковым рассеиванием рост эмиттанса может быть частично компенсирован удлинением сгустка, например, за счет использования гармонических резонаторов. На рис. 4 представлена зависимость эмиттанса и энергетического разброса от длины сгустка.

Видно, что рост продольного размера сгустка до 20 мм существенно уменьшает эмиттанс пучка. На базе масштабированной импедансной модели проведено исследование влияния гармонических резонаторов, работающих на третьей гармонике частоты генератора, на развитие неустойчивостей в накопителе USSR. На рис. 5 приведены зависимости эмиттанса и продольного размера сгустка от тока при установке пассивного ($V_3 = 0.0$) и ($V_3 = 2.0$ МВ) активных гармонических резонаторов.

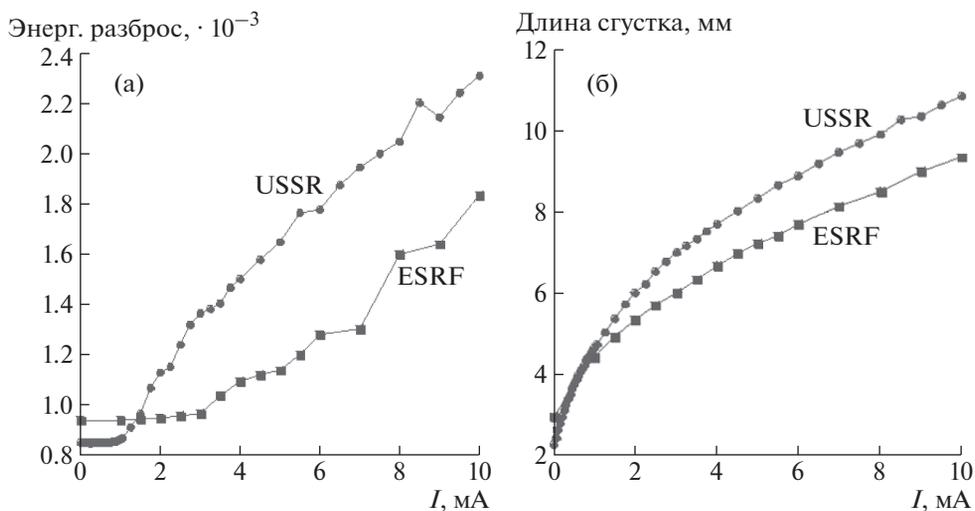


Рис. 1. Зависимости энергетического разброса (а) и длины сгустка (б) от его тока для установок ESRF и USSR.

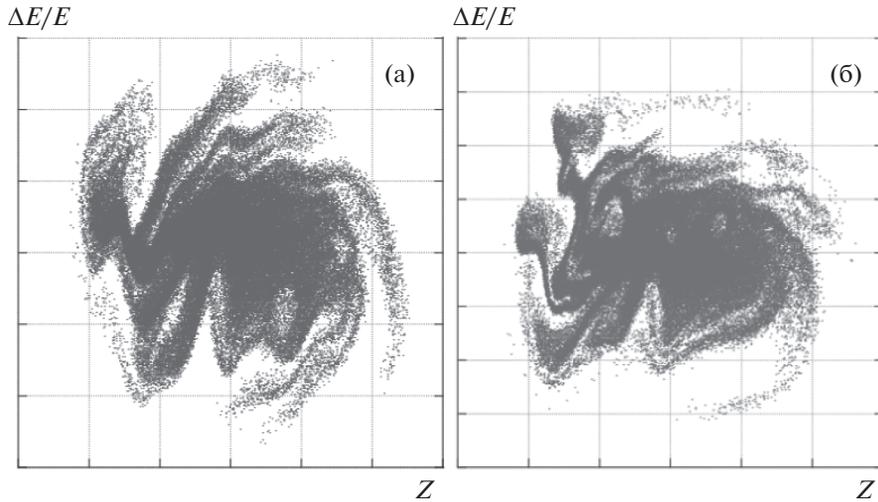


Рис. 2. Продольный фазовый портрет пучка USSR для двух различных значений тока 10 (а) и 12 мА (б).

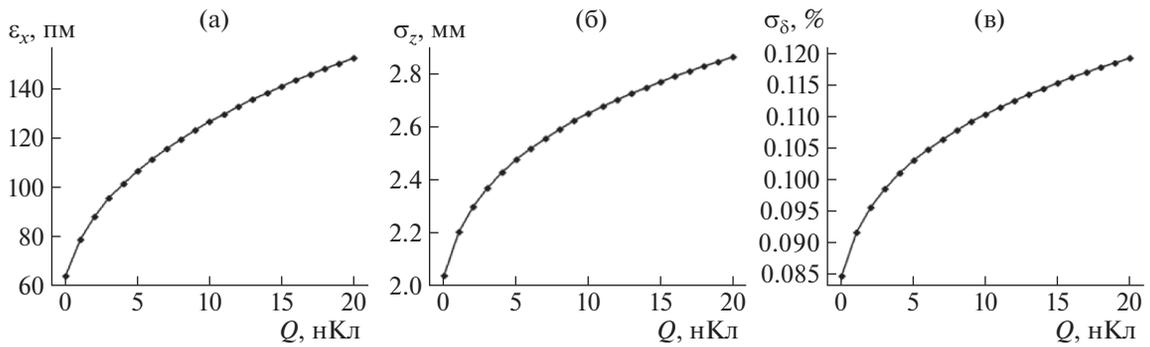


Рис. 3. Зависимости эмиттанса (а), продольного размера (б) и энергетического разброса (в) от заряда сгустка.

Видно, что за счет установки гармонических резонаторов можно добиться значительного удлинения сгустка, а также уменьшить эмиттанс пучка. В свою очередь удлинение сгустка, вы-

званное установкой гармонических резонаторов, приводит, как и следовало ожидать, к увеличению порогового тока микроволновой неустойчивости.

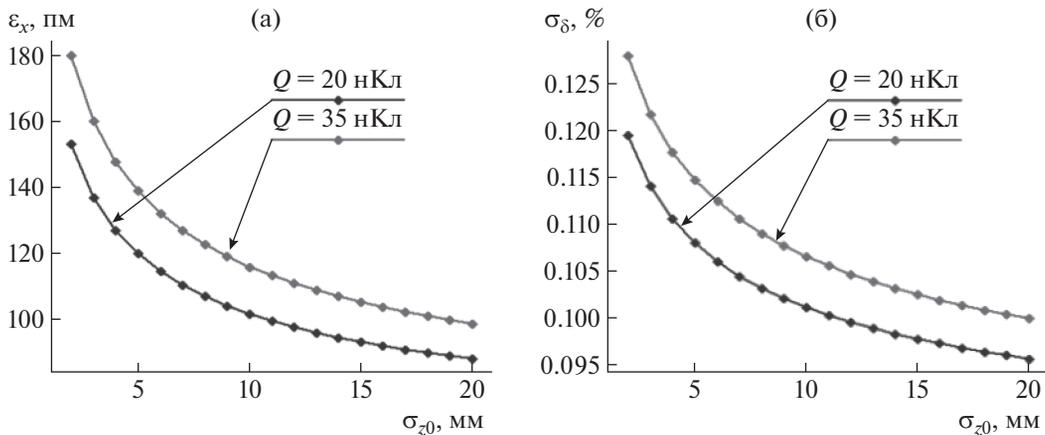


Рис. 4. Зависимость эмиттанса (а) и энергетического разброса (б) от длины сгустка.

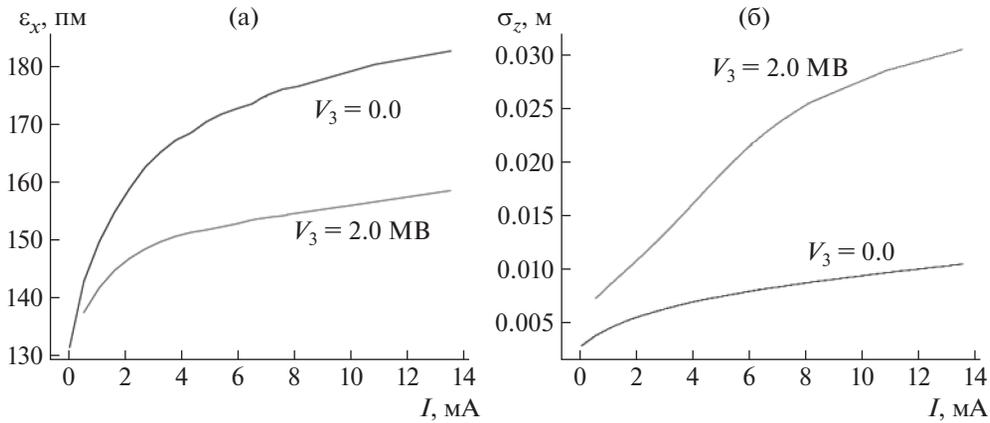


Рис. 5. Зависимость горизонтального эмиттansa (а) и длины сгустка (б) от его тока при установке пассивного ($V_3 = 0.0$) и активного ($V_3 = 2.0$ MB) резонаторов.

Верхняя и нижняя кривые рис. 6 представляют зависимости энергетического разброса от тока сгустка с установкой пассивного и активного гармонических резонаторов соответственно, а ромбами отмечены результаты расчета с учетом внутриволнового рассеяния.

Кроме того, с установкой гармонических резонаторов время жизни пучка также существенно возрастает, что и иллюстрируют зависимости рис. 7.

Детально исследовано влияние как резистивной, так и геометрической компоненты наведенного пучком поля на величину порога микроволновой неустойчивости. Виды наведенного поля и результаты расчетов приведены на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты показывают, что существенно уменьшить влияние микроволновой неустойчивости только за счет уменьшения резистивного импеданса стенок камеры (выбор материала) оказывается весьма проблематично. Уменьшение геометрического импеданса дает лучшие результаты, но достичь такого уменьшения импеданса оказывается гораздо более сложной задачей.

Для уменьшения негативного влияния неустойчивостей пучка в USSR должны быть предприняты следующие шаги:

1. Уменьшение импеданса отдельных элементов камеры накопителя.
2. Дальнейшая оптимизация параметров магнитной структуры кольца.

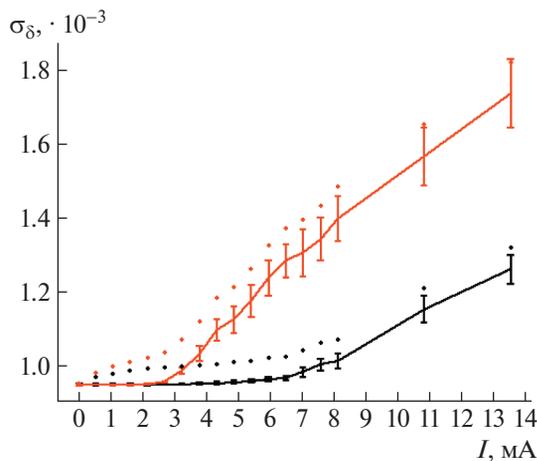


Рис. 6. Зависимости энергетического разброса в сгустке от его тока при наличии (нижняя кривая) и отсутствии (верхняя кривая) гармонических резонаторов.

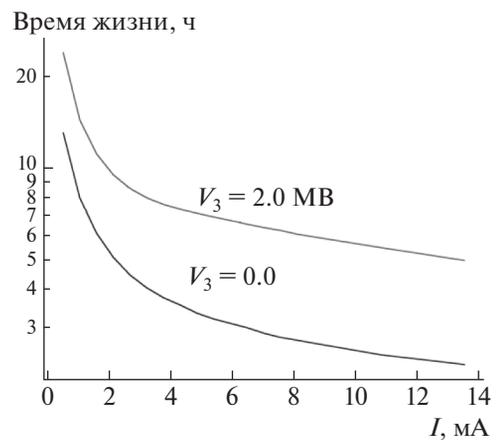


Рис. 7. Зависимость времени жизни сгустка от его тока при установке пассивного ($V_3 = 0.0$) и активного ($V_3 = 2.0$ MB) резонаторов.

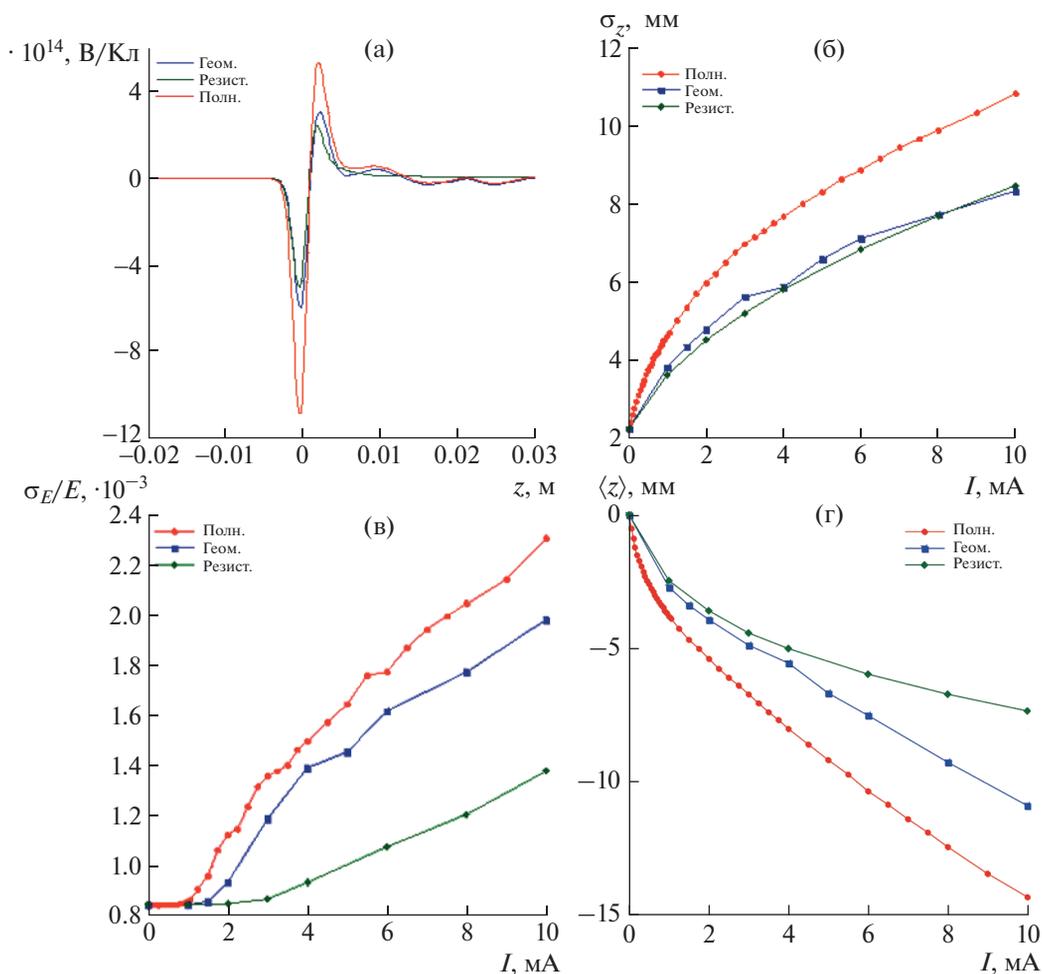


Рис. 8. Геометрическое, резистивное и полное наведенное сгустком поле (а), зависимости удлинения (б), энергетического разброса (в) и смещение центра тяжести сгустка (г) от его тока при учете различных компонентов наведенного поля.

3. Использование гармонических резонаторов.

4. Детальное исследование на основе самосогласованного подхода одновременного влияния внутрипучкового рассеяния и импедансов камеры на развитие неустойчивости пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Boussard D.* // CERN-LabII/RF/Int./75-2. 1975.
2. *Boni et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1998. V. 418. P. 241.
3. *Zobov M. et al.* // arXiv: physics/0312072 [physics.acc-ph]. 2003.

Microwave Instability in the USSR Synchrotron Radiation Source under Design

Y. Chae¹, S. V. Matsievsky^{2, 3}, V. I. Rashchikov^{2, 3, *}, and M. Zobov⁴

¹DESY, Hamburg, 22607 Germany

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

³National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia

⁴LNF-INFN, Frascati, 00044 Italy

*e-mail: VIRashchikov@mephi.ru

Received July 19, 2021; revised August 9, 2021; accepted August 9, 2021

Abstract—Investigation of instabilities that emerge in the interaction of a charged-particle beam with elements of the chamber of state-of-the-art synchrotron radiation sources and colliders is an important task,

since the beam parameters required in such facilities can only be attained if such effects are taken into account. Conditions for the development of a microwave instability in the USSR, a fourth-generation 6-GeV synchrotron radiation source with an emittance of 70 pm under design, are analyzed. The options to reduce its effect on the parameters of the beam accumulated in the accelerator ring and, as a result, on the output parameters of the facility are investigated.

Keywords: synchrotron radiation source, collider, beam instability, microwave instability, emittance, impedance, simulation