

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕЕК БИПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ В ХОДЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

© 2024 г. А. А. Батов^а, *, Р. А. Збруев^а, М. В. Лалаян^а, С. М. Полозов^а

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

*E-mail: AABatov@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Представлены результаты решения проблемы отклонения соотношения амплитуды электромагнитных полей в прототипе группирователя ускоряющей секции линейного ускорителя электронов прикладного назначения от расчетных значений. Рассчитаны вариационные характеристики, проведена корректировка модели структуры, изложены возможные причины и пути решения проблемы.

Ключевые слова: бипериодическая ускоряющая структура, электродинамические характеристики, линейный ускоритель электронов

DOI: 10.56304/S207956292405004X

ВВЕДЕНИЕ

Коллективами НИЯУ МИФИ и НПП “Корад” разработана серия линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) прикладного назначения. Данные ускорители используются для стерилизации, гамма-активационного анализа, тестирования дозиметрического оборудования. Они поставлены пользователям в России, Республике Корея, Узбекистане, Вьетнаме. В статье описаны работы по контролю электродинамических характеристик (ЭДХ) ячеек бипериодической ускоряющей структуры (БУС), выполняемые в ходе изготовления таких ускорителей [1–3]. Ускоряющая секция разрабатывалась на базе бипериодической ускоряю-

щей структуры с повышенным коэффициентом связи [4–6]. После изготовления одной из секций было выявлено, что соотношения полей в ячейках группирователя отличаются от расчетных. Необходимо было выяснить возможные причины отклонения соотношений амплитуд поля и на основании данного анализа предложить варианты доработки ускоряющей структуры.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Группирователь ЛУЭ включает в себя шесть ускоряющих ячеек (рис. 1). В ходе проведения сборки и измерений прототипа ускоряющей сек-

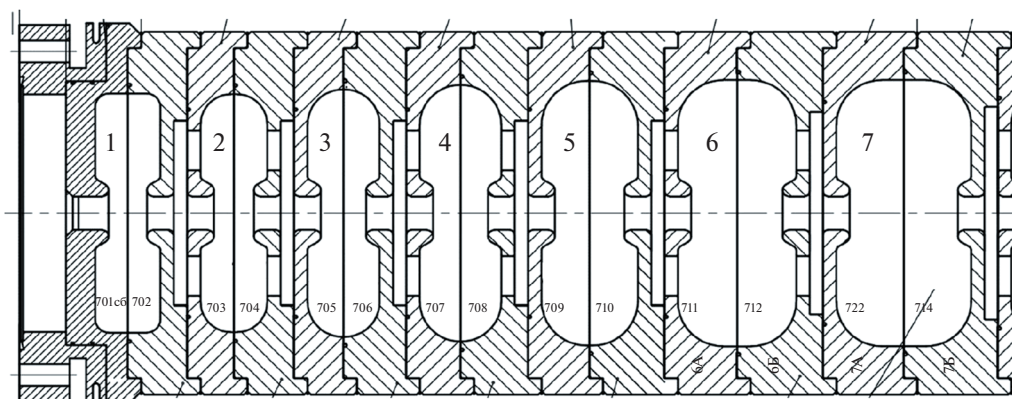


Рис. 1. Ячейки группирователя (1–6) и ячейка регулярной части (7) ускорительной секции.

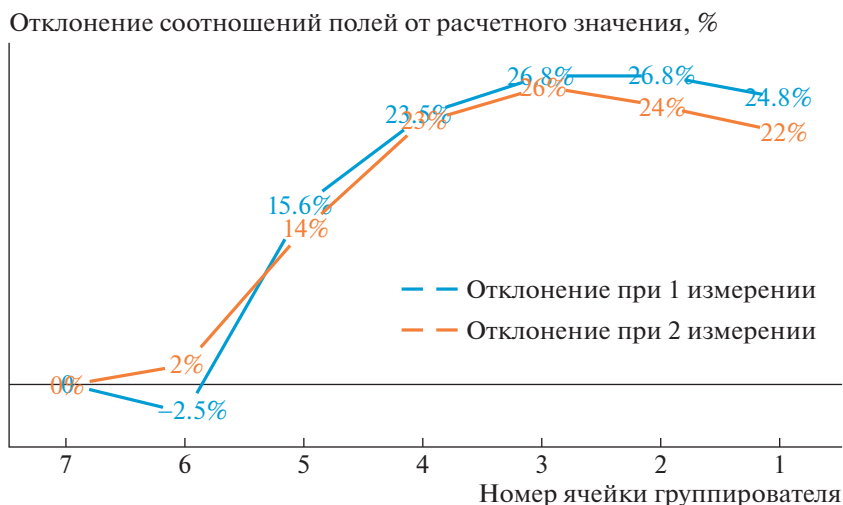


Рис. 2. Отклонения соотношения полей от расчетных значений.

ции были обнаружены значительные отклонения соотношений полей в 1–5 ячейках от расчетных значений (рис. 2).

На рис. 2 представлены отклонения от результатов моделирования значений соотношений напряженности электрического поля на оси структуры в ячейках группирователя. Измерения отклонений проводились несколько раз для подтверждения результатов (на рис. 2 представлены результаты двух итераций). Из рисунка видно, что соотношение полей между регулярной ячейкой (номер 7) и последней ячейкой группирователя (номер 6) имеет отклонение в пределах погрешности измерений. Далее величина отклонений растет до 22–26% в первых четырех ячейках группирователя.

При этом рабочая частота группирователя и собранного ускорителя в целом совпадают. Также были измерены добротность и рабочая частота каждого макета, состоящего из двух ускоряющих полуячеек и одной ячейки связи между ними. Эти измерения также не выявили проблем. Таким образом, отклонение могло быть вызвано неточностями при изготовлении тех элементов структуры, которые мало влияют на рабочую частоту, но заметно искажают соотношение полей.

ВАРИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЧЕЙКИ

Исходя из анализа результатов измерений было предложено построить вариационные характеристики стандартного электродинамического макета (две ускоряющие полуячейки и одна ячейка связи) группирователя по частоте ускоряющего поля и поля в ячейках связи (рис. 3–4). С их помощью выявлены параметры, оказывающие минимальное влияние на рабочую частоту структуры. Для данной задачи был выбран макет, состоящий из

полуячеек 6–5 (номера полуячеек на рис. 1 – 710 и 711 соответственно) группирователя и ячейки связи между ними.

Для данного электродинамического макета также были построены вариационные характеристики для соотношения полей (рис. 5–6). Первая вариационная характеристика снималась без последующей донастройки частоты. Расчет производился при изменении параметров только полуячейки с номером 710 (одна ускоряющая полуячейка). Данный расчет помог выявить параметры с наиболее значительным влиянием на соотношение полей. Вторая характеристика получена для размеров окон связи с последующей донастройкой частоты с помощью увеличения радиуса ячейки. Расчет производился для оценки влияния расточки окон связи прототипа на частоту и распределение поля, в том числе на возбуждение электрического поля в ячейках связи.

Исходя из полученных вариационных характеристик, можно выделить ряд параметров ускоряющей структуры, которые оказывают наибольшее влияние на соотношение полей, но при этом сравнительно мало изменяют значение рабочей частоты. Различия в данных параметрах между моделью и прототипом с высокой вероятностью и являются причиной просадки амплитуды поля. В табл. 1 приведены параметры модели, неточности при изготовлении которых приводят к значительному отклонению соотношений амплитуд полей при небольшом влиянии на частоту.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

На основании полученных данных были определены возможные причины просадки поля в группирователе. Возможные причины:

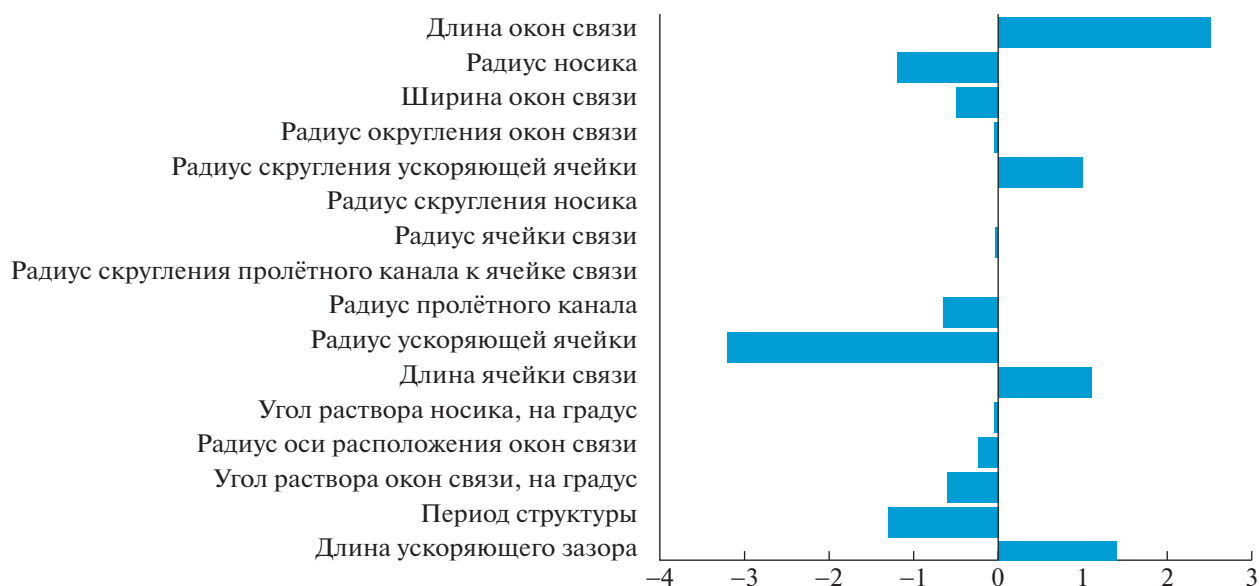


Рис. 3. Влияние изменения на 0.1 мм геометрических размеров модели на частоту ускоряющего поля, МГц.



Рис. 4. Влияние изменения на 0.1 мм геометрических размеров модели на частоту поля в ячейках связи, МГц.

А) Изменение конфигурации носиков диафрагмы в результате подстройки частоты ячейки путем смещения диафрагм.

Б) Изменение ширины окон связи на величину более миллиметра, смещение центральной линии окон или существенное изменение других их размеров (площади). Для случая изменения за счет одного из размеров, например только ширины или

только угла раствора окон, значения для наблюдаемой просадки поля соответствуют 0.94 мм и 10 градусам.

Возможные пути решения проблемы просадки поля в ячейках группирователя:

1. Для компенсации просадки поля за счет угла раствора окон связи необходимо расточить окно

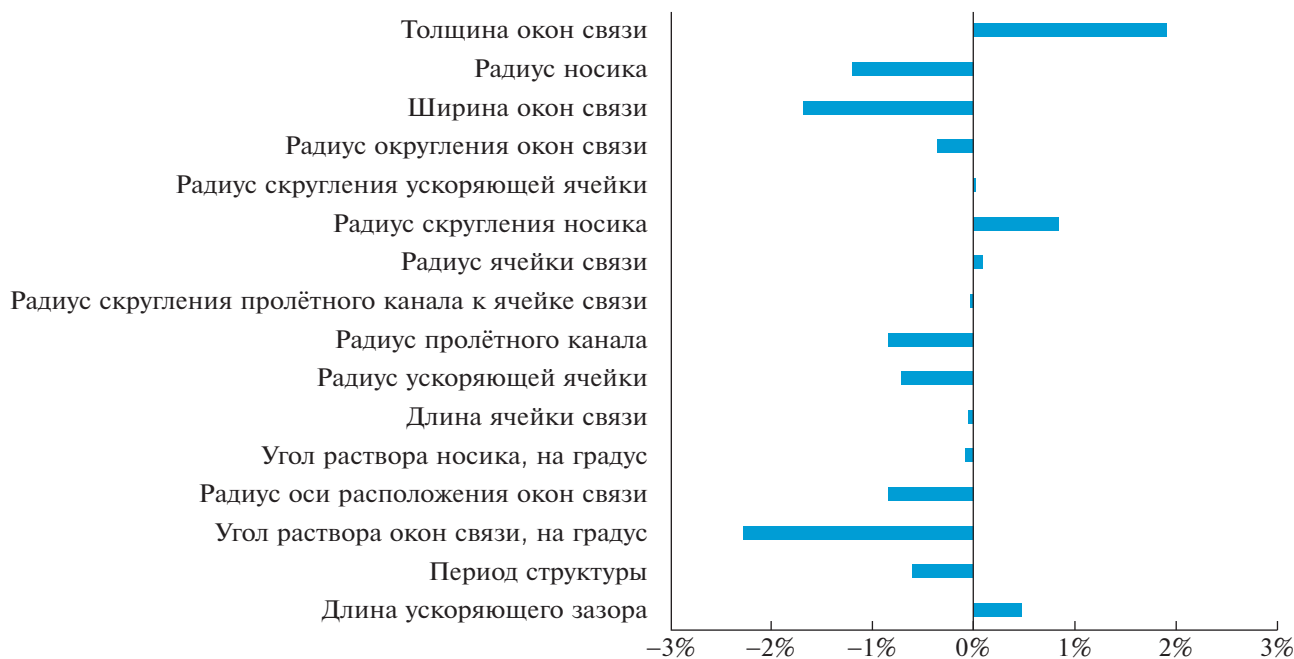


Рис. 5. Изменение соотношения полей в процентном отношении в соседних ячейках при изменении геометрических размеров на 0.1 мм без донастройки частоты.

связи в ячейке 6 на 5 градусов. Подобные изменения ячейки могут дать:

- необходимое соотношение полей между 5 и 6 ячейкой;
- уменьшение частоты ускоряющего поля на 5 МГц;
- уменьшение частоты поля в ячейках связи на 77 МГц.

2. Рассмотреть возможность заново изготовить полуячейки с номерами 710 и 711 ячейки.

3. Если после расточки окон связи между ячейками 6–5 проблема просадки останется, то можно попробовать последовательно растачивать окна связи между ячейками 5–4 и 4–3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен анализ причин просадок поля в группирователе ускоряющей секции линейного ускорителя электронов. Получены вариационные характеристики по частоте ускоряющего поля и поля в ячейке связи, изучено влияние па-

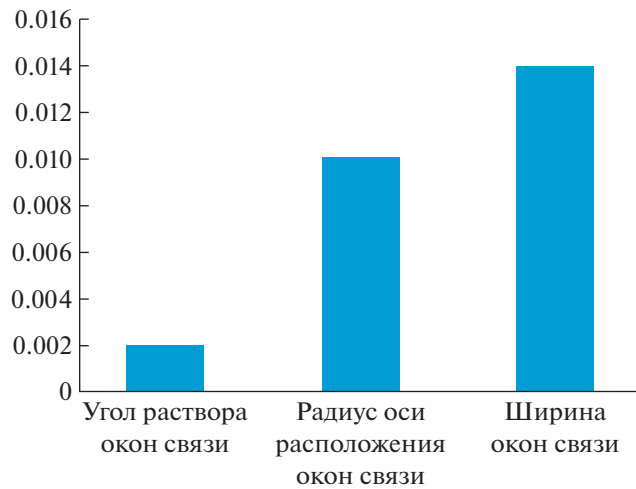


Рис. 6. Чувствительность соотношения полей при изменении геометрических размеров на 0.1 мм после донастройки рабочей частоты.

Таблица 1. Сравнение влияния параметров на соотношение полей в ячейках и на частоты ускоряющего поля и поля в ячейках связи

Название параметра	Угол раствора окон связи	Ширина окон связи	Толщина окон связи	Радиус носика
Изменение значение параметра	+1°	+0.1 мм	−0.1 мм	+0.1 мм
Влияние на соотношение полей	−0.02	−0.014	−0.016	−0.01
Влияние на частоту в ячейке связи, МГц	−10	−6	−1.5	—
Влияние на частоту в ускоряющей ячейке, МГц	−0.6	−0.5	−2.5	−1.2

раметров на соотношение амплитуд электрических полей в соседних ячейках. Рассмотрены возможные причины возникновения проблемы, а также обозначены пути ее решения. Как показали расчеты, производственные ошибки в размерах окон связи и носиков диафрагм БУС могут иметь значительные и трудноустраняемые последствия для ЭДХ структуры. Результаты данной работы показывают необходимость более тщательного контроля ключевых параметров ячеек в процессе изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Polozov S.M., Rashchikov V.I., Demsky M.I. // Proc. 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 493–495. <https://doi.org/10.18429/JACoW-Ru-PAC2016-WEPSB057>
2. Bondarenko T.V. et al. // Proc. 7th Int. Particle Accelerator Conference (IPAC'16), BEXCO, Busan, Republic of Korea, May 8–13, 2016. P. 1794–1796. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2016-TUPOW021>
3. Basyl D.S. et al. // Proc. 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 173–175. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016->
4. Lalayan M. et al. // Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'21), Alushta, Russia, Sept. 27– Oct. 1, 2021. Geneva. JACOW Publ. P. 186–188. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA42>
5. Збруев Р.А., Батов А.А. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (4). С. 385–388. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050554> [Zbruev R.A., Batov A.A. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (11). P. 1890–1893. <https://doi.org/10.1134/S1063778822100660>].
6. Батов А.А., Збруев Р.А., Гусарова М.А., Лалаян М.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. Т. 14 (3). С. 269–272. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050050> [Batov A.A. et al. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (10). P. 1733–1736. <https://doi.org/10.1134/S1063778822100064>].

Control of Electrodynamic Characteristics of Biperiodic Accelerating Structure Cells During Manufacturing

A. A. Batov¹, *, R. A. Zbruev¹, M. V. Lalayan¹, and S. M. Polozov¹

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

*e-mail: AABatov@mephi.ru

Received June 19, 2023; revised June 22, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—The results are presented for resolving the issue of deviation of the amplitude ratio of electromagnetic fields from the calculated values in the prototype buncher of the accelerating section of linear electron accelerator for applied purposes. Variational characteristics have been calculated, the structure model has been adjusted, and possible causes and solutions of the problem have been outlined.

Keywords: biperiodic accelerating structure, electrodynamic characteristics, linac, buncher, linac manufacturing, manufacturing issues, linear accelerators for applied purposes linear electron accelerator