

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ВЕЛИЧИНУ МАКСИМАЛЬНОГО УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ ДЛЯ БИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРОЕКТА СИЛА

© 2022 г. Р. А. Збруев^а, *, М. А. Гусарова^а, М. В. Лалаян^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

*E-mail: romanzbruev@mail.ru

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 09.08.2021 г.

В работе представлены результаты расчета ЭДХ для бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи, предназначенной для линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта источника синхротронного излучения 4-го поколения СИЛА. Рассмотрены вопросы ограничения ускоряющего поля структуры электрическими и магнитными полями на поверхности резонатора в S, C и X частотном диапазоне.

Ключевые слова: бипериодическая ускоряющая структура, метод масштабирования, электродинамические характеристики, импульсный нагрев

DOI: 10.56304/S2079562922010444

ВВЕДЕНИЕ

Инжекционный комплекс проекта источника синхротронного излучения 4-го поколения СИЛА [1–3] включает в себя линейный ускоритель на энергию 6 ГэВ с двумя высокочастотными пушками. Линейный ускоритель служит для инъекции в основной накопитель и потенциально рассматривается в качестве драйвера цуга ярких

электронных сгустков для лазера на свободных электронах (рис. 1).

В качестве ускоряющих структур линейного ускорителя инжекционного комплекса предполагается использование бипериодических структур (БУС) S-диапазона [3]. Общая схема линейного ускорителя электронов на энергию 6 ГэВ для комплекса СИЛА представлена на рис. 2. Ускори-

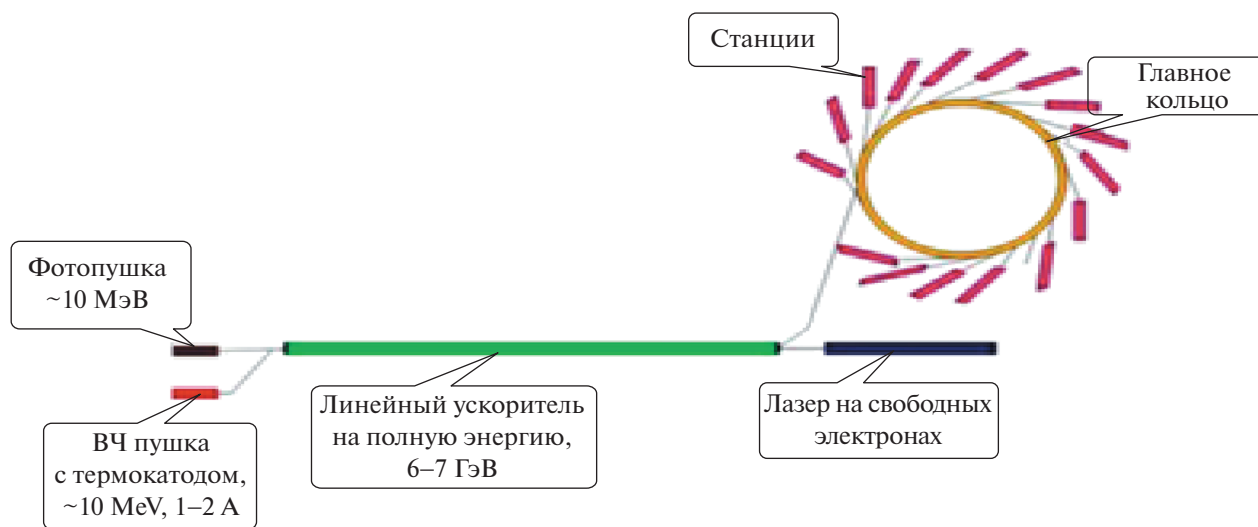


Рис. 1. Схема источника СИ с линейным ускорителем на полную энергию.

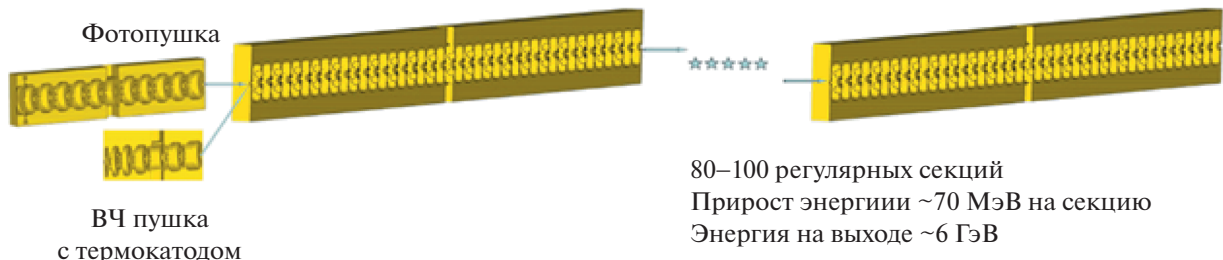


Рис. 2. Общая схема линейного ускорителя электронов на энергию 6 ГэВ.

тель включает в себя 86 секций на стоячей волне, каждая из которых содержит 40 периодов БУС. Инжекционный комплекс при использовании линейного ускорителя на основе бипериодических структур S-диапазона будет располагаться в отдельном здании длиной около 800 м, примыкающем к кольцеобразному зданию накопителя и сооруженном на несвязанном с ним фундаменте.

Наряду с этим рассматривается возможность перехода к структурам диапазонов С и Х, применение которых позволяет достичь высоких ускоряющих градиентов при большей компактности линейного ускорителя. Примером комплекса с ускоряющей структурой, работающей на более высокой частоте по сравнению с традиционным для электронных линаков S-диапазоном служит проект EuPRAXIA — модернизация испытательного комплекса SPARC LAB в Национальном институте ядерной физики Фраскати [4].

Ниже представлены результаты исследования ЭДХ и ограничений на величину максимального ускоряющего поля для бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи [5], вид модели которой изображен на рис. 3.

МАСШТАБИРОВАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

За основу была взята бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи, с

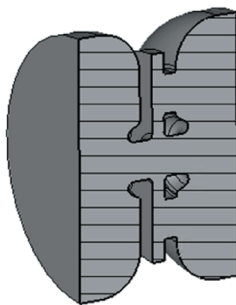


Рис. 3. Бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи.

повышенным коэффициентом связи, рассчитанная на частоту 2856 МГц [5]. Исходная модель методом масштабирования была настроена на частоты 2800 МГц, 8400 МГц и 11200 МГц, что соответствует S, C и X-диапазонам. Суть метода состоит в изменении геометрических параметров структуры в K раз, где K — коэффициент масштабирования. Для более точной настройки на заданные частоты радиус ячейки связи бипериодической ускоряющей структуры уточнялся повторным масштабированием с введением дополнительного коэффициента масштабирования K_2 . Таким образом коэффициент масштабирования ячейки связи модели: $K_{\text{сop}} = KK_2$. Результаты масштабирования представлены в табл. 1.

Для модели каждого диапазона были рассчитаны электродинамические характеристики. В табл. 2 приведены значения собственной добротности структур, коэффициента связи, максимального значения электрического поля на поверхности структуры E_p^* , максимального значения напряженности ускоряющего поля $E_{z\text{max}}^*$ и коэффициента перенапряженности. Значения напряженностей поля E_p^* и $E_{z\text{max}}^*$ рассчитаны при 1 Дж запасенной в резонаторе энергии.

Величина ускоряющего поля $E_{z\text{max}}$, которую реально можно получить в ускоряющей структуре, ограничена предельно допустимыми значениями электрического E_p и магнитного H_p поля на поверхности резонатора. Высокие значения напряженности электрического поля на поверхности структуры приводят к возникновению темновых токов и пробоям при высоком напряжении. Магнитное поле вызывает протекание токов по поверхности структуры и ее нагрев. Нагрев может вызывать тепловую деградацию материала структуры и в этом случае ограничение на величину ускоряющего градиента будет определяться максимально возможным магнитным полем.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУРЫ

Существуют различные подходы к определению максимального электрического поля на поверхности структуры [6–8]. Значительное влияние на величину максимального электрического поля в структуре оказывает длительность импульса и частота. При оценке величин предельного электрического поля на поверхности для структур до 1.5 ГГц для длинных импульсов используют критерий Килпатрика [6], показывающий связь величины предельного поля на поверхности структуры без возникновения пробоев и частоты структуры (1). При работе структур в импульсном режиме с короткой длинной импульса вводится поправочный коэффициент b (2), который лежит в диапазоне от 1 до 2. При длине импульса менее 1 мс значение коэффициента максимально: $b = 2$. При очень коротких импульсах менее 1 мкс зависимость величины максимального электрического поля на поверхности наблюдается как выражение (3) [7].

$$f \text{ (МГц)} = 1.64 E_K^2 e^{-8.5/E_K}; \quad (1)$$

$$E_p = b E_K; \quad (2)$$

$$E_p \propto f^{1/2} / t^{1/4}. \quad (3)$$

С увеличением частоты свыше 1.5 ГГц величина максимального электрического поля на поверхности структуры растет. Пределы поля в небольших структурах (частота более 1.5 ГГц) на стоячей волне были исследованы в работах [8, 9]. Исследования проводилось при длительностях импульса от 1.5 до 3.8 мкс. В результате этого исследования была получена зависимость Ванг и Лоу (4):

$$E_p \approx 195 f \text{ (ГГц)}^{1/2} \text{ МВ/м}. \quad (4)$$

Проведено сравнение предельных значений напряженности поля на поверхности структуры, полученных согласно критерию Килпатрика (1) и критерию Ванг и Лоу (4). При оценке согласно критерию Килпатрика поправочный коэффициент b был взят равным 2 так как длина импульса в инжекционном ускорителе проекта СИЛА будет составлять 1.5 мкс. В табл. 3 приведены расчетные значения предельных значений напряженности поля на поверхности структуры при оценке по этим критериям. Показано, что значения напряженности поля при использовании критерия Килпатрика и критерия Ванг и Лоу отличаются более чем втрое.

По мере увеличения частоты поле пробоя увеличивается до тех пор, пока не будет достигнут предел нагрева поверхности. При этом необходимо отметить, что поверхностный нагрев не зави-

Таблица 1. Коэффициенты масштабирования для БУС при переходе на повышенную рабочую частоту

Рабочая частота	K	K_2	$K_{\text{сop}}$
8400 МГц	0.3402	1.1071	0.3644
11200 МГц	0.2552	1.1071	0.2733

Таблица 2. Сводная таблица электродинамических характеристик бипериодических ускоряющих структур

f , МГц	Q	K , %	E_p^* , МВ/м	$E_{z\text{max}}^*$, МВ/м	$E_p^*/E_{z\text{max}}^*$
2798	10514	9.1	165	75	2.21
8399	6138	9.87	851	380	2.24
11200	5318	9.88	1301	580	2.24

Таблица 3. Расчетные значения предельных значений напряженности поля на поверхности структур E_p для БУС с внутренними ячейками связи

f , МГц	$E_p = 2E_K$, МВ/м	$E_p = 195(f)^{1/2}$, МВ/м
2800	90	326
8400	150	565
11200	170	653

сит от частоты, но зависит от длительности импульса и может быть достигнут раньше предела по величине электрического поля на поверхности структуры указанных в табл. 3.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТРУКТУРЫ

Импульсный радиочастотный нагрев — это процесс, при котором металл нагревается протекающими по его поверхности наведенными высокочастотными токами. Когда индуцированные термические напряжения превышают предел упругости, из-за циклической усталости возникают микротрещины и увеличивается шероховатость поверхности. Импульсный нагрев ограничивает максимальное магнитное поле на поверхности и, следовательно, максимально достижимый градиент ускорения в структуре ускорителя с нормальной проводимостью. Исследования по высокочастотному нагреву нормальнопроводящих ускоряющих структур X-диапазона проводилось в SLAC [9]. В данной работе было экспериментально показано, что для стабильной работы структур X-диапазона импульсный нагрев поверхности не должен превышать 50°C. Это ограничение позволяет обеспечить стабильность ра-

Таблица 4. Значения электрических и магнитных полей в БУС

f , МГц	$E_{\text{зmax}}^*$, МВ/м	E_p^* , МВ/м	H_p^* , кА/м	$H_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}$, кА/м	$k = H_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}/H_p^*$
2800	75.2	165.00	366.10	405.0	1.11
8400	378.9	851.10	1839.1	310.0	0.17
11200	583.5	1301.0	2835.1	285.0	0.10

боты структуры на уровне не более 1 пробоя на 10^6 импульсов. Повышение температуры внутренней поверхности ускоряющей структуры может быть оценено с помощью выражения (5):

$$\Delta T = \frac{|H_{\parallel}|^2 \sqrt{t}}{\sigma \delta \sqrt{\pi} c_e k}, \quad (5)$$

где $H_{\parallel}$ — значение напряженности магнитного поля вблизи поверхности, t — длительность ВЧ импульса, σ — проводимость материала структуры, δ — глубина скин-слоя, ρ — плотность материала, c_e — удельная теплоемкость материала, k — теплопроводность материала.

В табл. 4 для БУС с внутренними ячейками связи, рассчитанной на рабочую частоту 2.8 ГГц, 8.4 ГГц и 11.2 ГГц при длительности импульса 1.5 мкс приведены: значения электрического ускоряющего поля на оси структуры $E_{\text{зmax}}^*$, значения электрического E_p^* и магнитного полей H_p^* на поверхности структуры при 1 Дж запасенной энергии; расчетные значения максимального магнитного поля на поверхности структуры при ограничении на импульсный нагрев не более 50°C $H_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}$; нормировочные коэффициенты для расчета значений электрических полей на оси и на поверхности с учетом ограничения по магнитному полю на поверхности структуры k .

Исходя из ограничения на предельную величину магнитного поля на поверхности структуры пересчитаны предельные значения электрического поля на поверхности $E_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}$ для трех диапазонов. В табл. 5 представлено сравнение полученных значений $E_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}$ со значениями полей,

рассчитанных согласно критерию Килпатрика и критерию Ванг и Лоу.

Сравнение значений пикового электрического поля на поверхности структуры, рассчитанных согласно критерию Килпатрика (1), критерию Ванг и Лоу (4) и ограничения импульсным нагревом (5) дает различные результаты для диапазонов S, C и X. Из табл. 5 видно, что для структуры диапазона S величина максимального электрического поля на поверхности структуры при учете ограничения по импульсному нагреву при длительности импульса 1.5 мкс выше, чем величина поля, рассчитанная согласно критерию Килпатрика, но ниже, чем при ограничении по критерию Ванг и Лоу. Для структуры диапазона C, ограничение напряженности поля на поверхности структуры по импульсному нагреву оказывается сопоставима с величиной поля, рассчитанной по критерию Килпатрика, но существенно ниже значения, рассчитанного по критерию Ванг и Лоу. Для диапазона X критерий импульсного нагрева играет основную роль, и значение максимальных значений электрического поля на поверхности структуры, определяемый им, оказывается ниже, чем при оценке по критерию Килпатрика и критерию Ванг и Лоу.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ

С учетом результатов полученных выше, для определения максимальных значений ускоряющего поля для бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи был выбран критерий ограничения по импульсному нагреву, обеспечивающий стабильность работы структур

Таблица 5. Сравнение значения предельных значений напряженности поля на поверхности структур согласно критерию Килпатрика, критерию Ванг и Лоу и критерию ограничения импульсным нагревом

f , МГц	$E_p = 2E_K$, МВ/м	$E_p = 195(f)^{1/2}$, МВ/м	$E_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}$, МВ/м
2800	90	326	183.0
8400	150	565	144.7
11200	170	653	130.1

Таблица 6. Значения максимальных значений ускоряющего поля для бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи диапазонов S, C и X

f , МГц	$E_p^*/E_{\text{зmax}}^*$	$E_{p\Delta T < 50^\circ\text{C}}$, МВ/м	$E_{\text{зmax}\Delta T < 50^\circ\text{C}}$, МВ/м
2800	2.21	183.0	82.8
8400	2.24	144.7	64.6
11200	2.24	130.1	58.1

на уровне не более одного пробоя на 10^6 импульсов. Результаты расчета максимальных значений ускоряющего поля для структур диапазонов S, C и X приведены в табл. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен расчет ЭДХ бипериодических ускоряющих структур с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи, предназначенных для линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта источника синхротронного излучения 4-го поколения СИЛА при переходе на повышенную частоту. Показано, что для обеспечения стабильности работы структур на уровне не более одного пробоя на 10^6 импульсов ускоряющее поле E_{zmax} в структуре не должно превышать 65 МВ/м для диапазона С и 58 МВ/м для диапазона Х.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ashanin I.A. et al.* // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. P. 1646–1651.
2. *Polozov S.M. et al.* // Current Results of the 4th Generation Light Source USSR (Former SSRS4) Development. Proc. RuPAC-2018. 2018.
3. *Polozov S.M. et al.* // Beam Dynamics Simulation Results in the 6-GeV Top-Up Injection Linac of the 4th Generation Light Source USSR. Proc. RuPAC-2018. 2018.
4. *Diomede M., Alesini D., Bellaveglia M., Buonomo B. et al.* // RF Design of the X-Band Linac for the Eupraxia@Sparc_Lab Project. Proc. IPAC-2018. 2018. Vancouver, Canada.
5. *Савин Е.А., Собенин Н.П.* // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 5. С. 141–146.
6. *Wangler Th.P.* RF Linear Accelerators. 2008. Weinheim: Wiley-VCH.
7. *Palmer R.B.* // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1990. V. 40. P. 568.
8. *Wang J.W.* RF Properties Structures of Periodic for Linear Accelerating Colliders, Ph.D. Thesis. 1989. Stanford: Stanford Linear Accelerator Center. P. 56.
9. *Wang J.W., Loew G.A.* // SLAC-PUB-4866 (1989); Proc. IEEE Particle Accelerator. Conf. Chicago, IL, USA. 1989. Washington: IEEE. P. IJ37.

Analysis of the Maximum Accelerating Field Limitations for Biperiodic Structure of the SILA Project Injection Linear Accelerator

R. A. Zbruev^{1, *}, M. A. Gusarova¹, and M. V. Lalayan¹

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

*e-mail: romanzbruev@mail.ru

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

Abstract—The paper presents the research results of biperiodic accelerating structure with internal coupling cells for the linear accelerator proposed as an injector for 4th generation synchrotron radiation source SILA. The issues of accelerating field in accelerating structure limitation caused by surface electric and magnetic fields for S, C and X band operated cavities are considered.

Keywords: biperiodic accelerating structure, scaling method, electrodynamic characteristics, RF pulsed heating