

# РАЗРАБОТКА И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ СИНХРОТРОННО-ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА «СИЛА»

Ю. В. Зуев<sup>a, 1</sup>, М. А. Калиниченко<sup>a</sup>, М. В. Варламова<sup>a</sup>, З. А. Андреева<sup>a</sup>

<sup>a</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Представлена структура ускорителя электронов на полную энергию 6 ГэВ, обеспечивающую различные режимы работы синхротронного накопительного кольца и лазера на свободных электронах. Приводятся расчетные параметры элементов оптического тракта и результаты моделирования, обосновываются принятые технические решения.

A general description of the linear accelerator, operating at a total energy of 6 GeV, is presented. At various exploitation modes the accelerator feeds an electron beam into a storage ring or free electron laser. The simulation results and design parameters of the accelerator are given. The proposed technical solutions are being substantiated.

PACS: 29.20.dk; 29.20.db; 41.60.Cz

## ВВЕДЕНИЕ

Комплекс «СИЛА» разрабатывается в рамках федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований для размещения на территории ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт». Это специализированный источник синхротронного излучения четвертого поколения, объединяющий накопительное кольцо (НК) и лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Заполнение НК и возбуждение ЛСЭ должен обеспечивать один линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на полную энергию 6 ГэВ [1, 2] (рис. 1). Исходя из полученных расчетных данных [3], имеющегося опыта и предполагаемых режимов работы (импульсный ток ЛУЭ до 300 мА, длительность импульса тока не более 200 нс, частота посылок не более 100 Гц) принято решение о построении ускорителя на базе бипериодических ускоряющих структур (БУС) со стоячей волной, работающих в режиме запасенной энергии колебаний типа  $\pi/2$ . Из-за различия требований к пучку со стороны НК и ЛСЭ ускоритель имеет две форинжекторные части.

---

<sup>1</sup>E-mail: zuev@luts.niiefa.spb.su

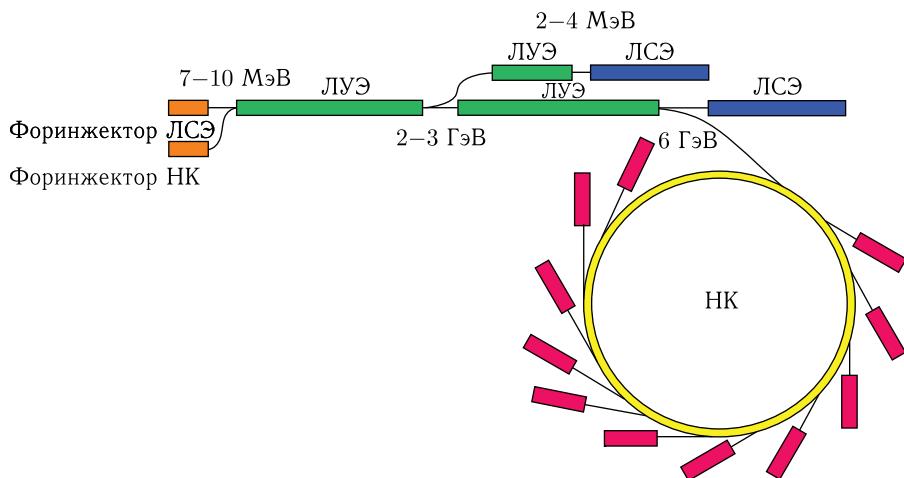


Рис. 1. Структурная схема ускорителя

## 1. ФОРИНЖЕКТОР ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА

В НК предельная величина равновесного эмиттанса пучка зависит от магнитной структуры кольца и энергии электронов. Эмиттанс и энергетический разброс частиц на выходе ЛУЭ прямого влияния на яркость излучения не оказывает, определяя, в основном, эффективность инжекции [4]. Инжекция на полной энергии (режим top-up) позволяет удерживать колебания среднего тока в НК на уровне 0,1–0,3 %, компенсируя потери добавлением небольшой порции заряда к уже циркулирующему. Это стабилизирует мощность излучения и снижает требования к величине импульсного тока ЛУЭ, но накладывает дополнительные ограничения на систему инжекции в кольцо [4, 5]. Ускоряющее поле НК изменяется с частотой 350 МГц. Вдоль равновесной орбиты длиной 1103 м в основном режиме будет циркулировать 1296 сгустков с полным током 200 мА. Для формирования этих сгустков и поддержания их интенсивности ЛУЭ должен обеспечивать небольшим одинаковым зарядом от 5 до 80 сепаратрис НК, следующих друг за другом (многосгустковый режим). В экспериментах с временным разрешением необходимо специальное либо комбинированное заполнение НК с одним или несколькими сгустками большой интенсивности. Для этого ЛУЭ должен работать в односгустковом режиме. Заполнение одной сепаратрисы максимальным требуемым зарядом (около 18 нКл) будет осуществляться повторной инжекцией тока.

Форинжектор для НК включает термоэмиссионный источник электронов (ИЭ) с сеточным управлением тока, группирователь-предускоритель и энергетический фильтр. Временная макроструктура пучка формируется напряжениями, подаваемыми на сетку ИЭ от двух независимых модуляторов. В многосгустковом режиме на постоянное запирающее напряжение накладывается синусоидальное открывающее, изменяющееся синхронно с ускоряющим полем НК. Такая модуляция снижает тепловую нагрузку вакуумных камер и радиационный фон, вызываемые электронами, движущимися вне сепаратрис НК. Длительность импульсов синусоидаль-

ного напряжения варьируется в диапазоне 10–200 нс, максимальная частота посылок 100 Гц. В односгустковом режиме для отпирания ИЭ используется импульсное напряжение с вершиной около 2 нс и короткими фронтами. ИЭ на базе катодно-сеточного узла лампы ГС-34 и модуляторы разрабатываются специалистами ИХКГ СО РАН [6].

Группирователь-предускоритель увеличивает энергию электронов с 50 кэВ до 10 МэВ и осуществляет модуляцию тока пучка с частотой колебаний поля в ЛУЭ (2800 МГц). Это создает необходимые условия для дальнейшего ускорения электронов с минимальным энергетическим разбросом и потерями тока. Группирование и ускорение осуществляется в БУС из 17 ускоряющих ячеек и 16 ячеек связи, расположенных вдоль оси пучка. Первые 10 ячеек образуют адиабатический группирователь с плавным увеличением длины ячеек и амплитуды поля (рис. 2). Амплитуда ускоряющего поля на регулярной части БУС 32,3 МэВ/м, расчетная величина потребляемой импульсной мощности 2,5 МВт, длина структуры 0,8 м. При номинальных параметрах входного пучка ( $I_B = 500$  мА,  $R_B = 1,9$ – $2,0$  мм,  $R'_B = -8$ – $12$  мрад) более 70% тока ИЭ будет собрано в сгустки с фазовой протяженностью не более  $10^\circ$ .

Параллельный перенос при вводе пучка в основную часть ЛУЭ позволяет реализовать энергетический фильтр на базе двух отклоняющих магнитов с коллимирующей щелью. Фильтр отсеивает частицы, движущиеся вне сепаратрисы ЛУЭ, снижая тепловую нагрузку стенок резонаторов и радиационный фон. Размещение триплета квадрупольных линз между дипольными магнитами делает систему ахроматичной и фокусирующей в двух плоскостях.

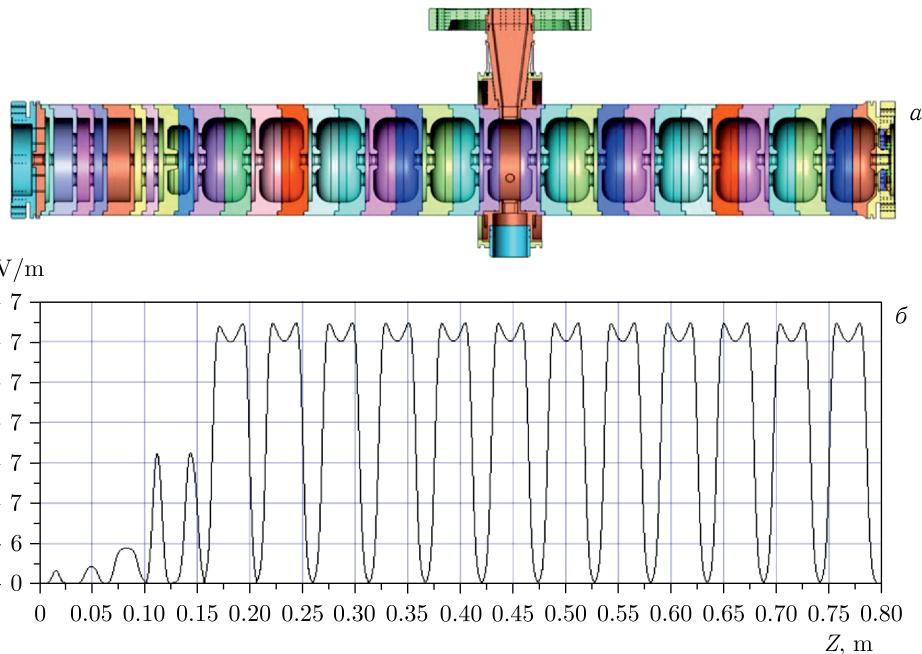


Рис. 2. а) Конструкторская модель БУС с группирователем пучка. б) Расчетное распределение амплитуды электрического поля на оси БУС

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ УСКОРИТЕЛЯ

Основная часть ЛУЭ состоит из последовательности одинаковых ускоряющих БУС с регулярной структурой поля и предназначена для ускорения релятивистских электронов с минимальным возрастанием нормализованного поперечного эмиттанса и минимальным энергетическим разбросом. Необходимые условия такого ускорения: достаточно малые поперечные размеры и фазовая протяженность сгустка, сформированного форинжектором; тщательная настройка секций по амплитуде ( $\pm 0,01\%$ ), частоте (не более  $\pm 10$  кГц) и фазе ( $\pm 0,03^\circ$ ) колебаний поля; тепловая стабилизация ускорителя (не хуже  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ) и всего обеспечивающего оборудования.

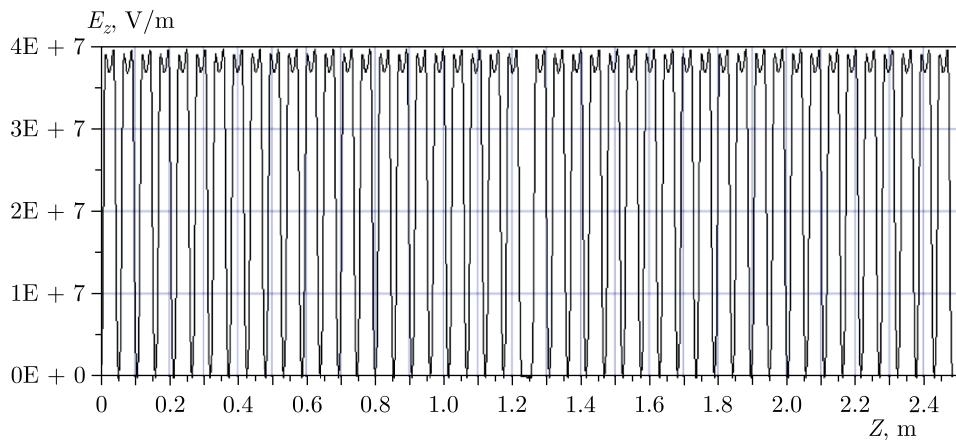


Рис. 3. Расчетное распределение амплитуды электрического поля на оси БУС с двумя вводами мощности для основной части ЛУЭ

Для повышения электрической прочности и упрощения радиотехнической настройки БУС основной части изготавливается из двух идентичных подсекций, соединяемых трубкой дрейфа определенной длины (рис. 3), возбуждается от одного клистрона через два ввода мощности и 3-дБ мост. Применение волноводно-щелевого моста дает возможность исключить из ВЧ-тракта ферритовый вентиль/циркулятор, используемый для развязки клистрона и БУС по отраженной волне. Каждая подсекция включает 45 резонаторных ячеек с коэффициентом связи около 6 %. Расчетная величина эффективного шунтового сопротивления структуры чуть более 110 МОм/м, максимальное значение амплитуды электрического поля на оси 39,8 МВ/м. При затратах ВЧ-мощности около 14 МВт БУС длиной 2,5 м обеспечивает прирост энергии более 50 МэВ. Для ускорения электронов до энергии 6 ГэВ потребуется 120 таких БУС. Для сохранения поперечных размеров пучка малыми в состав ЛУЭ включены триплеты квадрупольных линз, устанавливаемые в специальных технологических промежутках между секциями регулярной части (один промежуток длиной около 2 м на каждые 4–8 секций). Короткие соленоидальные линзы предусмотрены для форинжекторов.

## 3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ НА ЛСЭ

Для работы рентгеновского ЛСЭ в режиме самоусиления спонтанной эмиссии (SASE) требуются сгустки электронов с энергией выше 3 ГэВ, пиковым током 2–5 кА,

малым энергетическим разбросом 0,01–0,05 % и нормализованным эмиттансом 1–3  $\text{мм} \cdot \text{мрад}$  [7]. Приведенные оценки эмиттанса и разброса являются локальными, так как относятся к малой части сгустка длиной, равной разности хода электрона и излучения за время их нахождения в ондуляторе, т. е. менее 1 мкм. Форинжектор для ЛСЭ разрабатывается специалистами НИЯУ МИФИ и включает ВЧ-фотопушку на основе ускоряющей структуры из 3,5 ячеек с  $\pi$ -типов колебаний стоячей волны [8]. Фотопушка с лазерным возбуждением должна формировать электронные сгустки длительностью 0,3–2,0 пс, зарядом 0,1–1,0 нКл и энергией чуть более 7 МэВ. Дальнейшее ускорение осуществляется в основной части ЛУЭ.

Увеличение пикового тока за счет сжатия сгустка по длительности до 20–200 фс потребует установки одного или двух магнитных группирователей. Оптический канал группирователя обычно включает четыре одинаковых дипольных магнита прямоугольной формы, расположенных в вершинах равнобедренной трапеции (magnetic chicane) [9]. Поступающий в группирователь сгусток должен иметь квазилинейное изменение средней энергии по длине, для чего ускоряться в надлежащей фазе ВЧ- поля БУС. Особенности движения электронов в магнитном группирователе порождают ряд физических процессов, ухудшающих эмиттанс. Для подавления этих процессов или компенсации их последствий в состав ЛУЭ могут быть включены дополнительные ускоряющие секции, работающие на гармониках частоты колебаний поля регулярных БУС [7], лазерный подогреватель пучка (laser heater) [10] и др.

В лазерную часть комплекса входит несколько ондуляторных станций, работа которых перекрывает спектральный диапазон излучения с энергией фотонов от 50 эВ до 10 кэВ. Для плавной перестройки частоты излучения ЛСЭ в структуре ЛУЭ предусмотрена специальная часть — ответвление, включающее несколько десятков регулярных секций, позволяющих изменять энергию электронов непрерывным образом от 2 до 4 ГэВ. При ответвлении пучка с энергией 3 ГэВ потребуется 20 регулярных БУС, работающих на ускорение или замедление электронов. Отвод электронов с энергией 2 ГэВ снижает требования к системе перепуска пучка в параллельный ускоряющий канал, но увеличивает число дополнительных секций до 40. Плавное регулирование энергии будет осуществляться изменением фазы колебаний поля в отдельных БУС специальной части ЛУЭ. Для минимизации энергетического разброса сгустки электронов в соседних секциях должны располагаться по разные стороны от максимума поля эквивалентной бегущей волны симметричным образом. По составу оборудования и конструктивно канал перепуска пучка из основной части ЛУЭ в специальную близок двум периодам НК, один из которых в точкестыковки повернут на 180°.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численно-аналитических исследований определена структура и состав оборудования линейного ускорителя электронов для синхротронно-лазерного комплекса «СИЛА». Сформулированы требования к составным частям ЛУЭ, проанализированы особенности их работы. Получены расчетные значения конструктивных и электродинамических параметров ускоряющих структур на основе БУС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ковалчук М. В. и др.* Источник синхротронного излучения четвертого поколения с рентгеновским лазером на свободных электронах «СИЛА»: концепция ускорительно-накопительного комплекса // Кристаллография. 2022. Т. 67, № 5. С. 726–734.
2. *Гавриш Ю. Н. и др.* Ускорительно-накопительный комплекс мегаустановки «СИЛА» // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 257–265.
3. *Ашанин И. А. и др.* Линейный электронный ускоритель-инжектор для специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения «СИЛА» // Вестн. Мос. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2023. Т. 78, № 1. 2310401.
4. *Левицев Е. Б.* Накопители электронов с малым эмиттансом // УФН. 2018. Т. 188, № 1. С. 31–54.
5. *Tanaka H. et al.* Stable Top-Up Operation at Spring-8 // J. Synchrotron Radiat. 2006. V. 13. P. 378–391.
6. *Chernousov Yu. D., Shebolaev I. V., Ikryanov I. M.* New Experimental Results on RF Accelerator with Parallel-Coupled Structure and RF-Controlled Gun // Proc. 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2016), Saint Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 224–226.
7. *Emma P.* Accelerator Physics Challenges of X-Ray FEL SASE Sources // Proc. EPAC 2002, Paris, France, 2002. P. 49–53.
8. *Ашанин И. А. и др.* Проект ВЧ-фотопушки для линейного-ускорителя инжектора для ЛСЭ проекта «СИЛА» // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(54). С. 410–417.
9. *Di Mitri S.* Bunch-Length Compressors // Proc. CAS–CERN Accelerator School: Free Electron Lasers and Energy Recovery Linacs, Hamburg, Germany, May 31 – June 10, 2016.
10. *Pedrozzi M. et al.* The Laser Heater System of SWISSFEL // Proc. FEL 2014, Basel, Switzerland, 2014. THP059. P. 871–877.

Получено 28 октября 2024 г.