

Повышение стабильности сильноточечного электронного пучка в ускорителе «ЛИУ», перспективы его применения в длинном ЛСЭ

Е.С. Сандалов^{1,*}, С.Л. Синицкий¹, А.В. Аржанников¹, Д.И. Сковородин¹, П.В. Логачев¹, П.А. Бак¹, Д.А. Никифоров¹, К.И. Живанков¹, Е.К. Кенджебулатов¹, Н.С. Гинзбург¹, Н.Ю. Песков¹, Р.В. Протас²

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

*e.s.sandalov@inp.nsk.su

Аннотация. Проблема создания мощных источников когерентного электромагнитного излучения в субТГц/ТГц – диапазонах частот имеет большую актуальность для научных исследований и технических приложений. В качестве возможного варианта такого источника может быть использован лазер на свободных электронах (ЛСЭ) на основе длинноимпульсного (~100 нс) интенсивного релятивистского электронного пучка, генерируемого в линейном индукционном ускорителе. Проект такого ЛСЭ, сочетающий в себе высокоселективную сверхразмерную электродинамическую систему с диаметром пространства взаимодействия ~ 40–50 λ и электронный пучок ускорителя «ЛИУ» (5 МэВ/2 кА/100 нс), позволит продвинуть ЛСЭ-генераторы в субТГц/ТГц диапазоны с субгигаваттным уровнем мощности и рекордным значением энергосодержания в импульсе излучения ~10–100 Дж. Электронный пучок, генерируемый этим ускорителем, обладает низкими значениями нормализованного поперечного эмиттанса (~550 п·мм·мрад) и энергетического разброса электронов (~1–2%). Еще одним необходимым условием его эффективного использования в широком классе перспективных научно-технических приложений является устойчивость такого пучка. В статье представлены экспериментальные результаты исследования устойчивости электронного пучка в ускорителе «ЛИУ» относительно развития наиболее опасной – поперечной неустойчивости пучка (Beam BreakUp instability). Для ее подавления нами предложен ряд методов, которые были успешно реализованы в экспериментах на «ЛИУ». После повышения устойчивости пучка он стал пригоден для достижения максимального электронного КПД в ЛСЭ-генераторе субТГц/ТГц-излучения с субгигаваттным уровнем импульсной мощности.

Ключевые слова: линейный индукционный ускоритель, сильноточечный электронный пучок, неустойчивость электронного пучка, лазер на свободных электронах.

1. Введение

Известно, что интенсивные электронные пучки востребованы в широком кругу научных и технических приложений: в области термоядерного синтеза, материаловедения, спектроскопии, рентгенографии быстропротекающих процессов, в химии и биомедицине [1–3]. Большой интерес для науки представляет задача создания на основе таких пучков источников когерентного электромагнитного излучения в ТГц-диапазоне с субГВт уровнем мощности. Актуальность подобных исследований, в частности, обусловлена потребностью в таких источниках для разработки новых химических соединений, лекарств и энергетических материалов, например, для реализации механизма вибрационных процессов накачки в кристаллических структурах материалов [4, 5]. Несколько лет назад совместно в ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ был создан новый линейный индукционный ускоритель «ЛИУ» (5–20 МэВ/2 кА), позволяющий формировать электронные пучки с рекордно низкими значениями нормализованного эмиттанса ~550 п·мм·мрад и углового разброса ~1–2% [6–8]. Подобные пучки в ближайшем будущем планируется использовать в качестве драйвера уникального ЛСЭ-генератора с частотой излучения 0.3, 0.6 и в перспективе 1.2 ТГц с субгигаваттным уровнем импульсной мощности (энергия в импульсе ~10–100 Дж) [9, 10].

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение устойчивости килоамперного релятивистского электронного

пучка в ускорительной структуре «ЛИУ». В рамках работы представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных значений инкрементов поперечной неустойчивости в различных режимах работы ускорителя. Кратко описаны основные факторы, влияющие на развитие поперечной неустойчивости в ЛИУ, и примененные методы ее подавления. Уникальность данных исследований обусловлена проведением экспериментов с пучком, обладающим рекордно-низким эмиттансом, на единственном в мире ускорителе в своем классе, который обладает дискретной фокусирующей магнитной системой.

2. Структура ускорительного комплекса «ЛИУ» и ЛСЭ-генератора

Общая схема ускорителя «ЛИУ» на энергию 5–20 МэВ приведена на рис. 1 [7, 8]. Генерация и первичное формирование электронного пучка осуществляется в инжекторе ускорителя, конструкция которого подробно описана в [6]. Следует отметить, что специально подобранные геометрия диода и конфигурация магнитного поля фокусирующей системы инжектора определили минимальное значение поперечного эмиттанса пучка [9]. После выхода из инжектора электронный пучок направляется в ускоряющую структуру, которая представлена в виде последовательности из 30 одинарных (КУМ) и 12 сдвоенных (ДУМ) ускорительных модулей. Каждый ускоряющий модуль обеспечивает прирост энергии пучка на величину до 0.4 МэВ. Фокусировка пучка при его движении в тракте ускорителя осуществляется с помощью 72 бронированных магнитных импульсных линз диаметром 220 мм и длиной 200 мм с максимальной индукцией поля на оси 0.27 Тл.

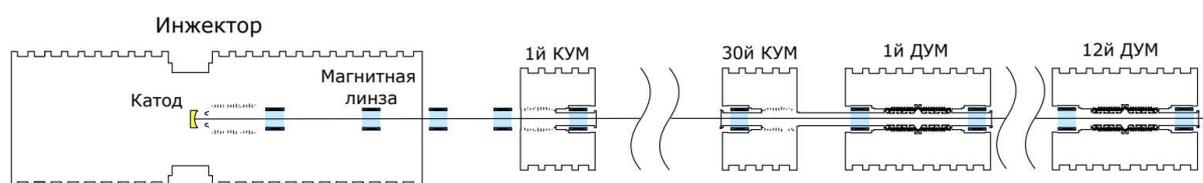


Рис. 1. Общая схема ускорительного комплекса ЛИУ. Черным цветом показаны инжектор и ускорительные модули, синим – фокусирующие магнитные линзы.

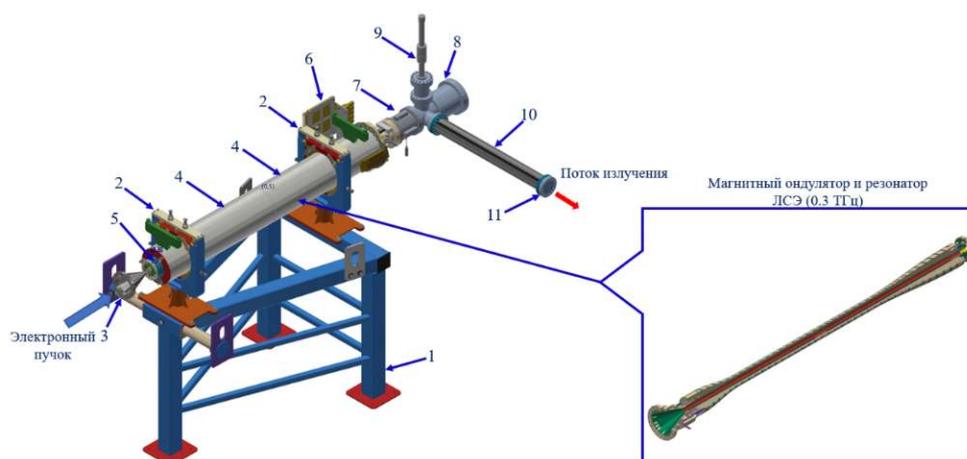


Рис. 2. Общая схема секции ЛСЭ. Цифрами на рисунке отмечены: 1 – подставка, 2 – система позиционирования, 3 – вакуумный канал, 4 – соленоиды компрессии, 5 – винтовой бифилярный ондулятор, 6 – платформа для монтажа подводов тока, 7 – монитор положения пучка (пикап), 8 – система вывода излучения и сброса пучка на коллектор, 9 – вакуумный ввод крепления зеркала (металлической фольги) для отделения потока излучения от пучка, 10 – вакуумный канал для вывода излучения, 11 – барьерное резонансное окно (материал Nb).

В экспериментах по генерации субТГц/ТГц излучения на выходе ускорителя «ЛИУ» планируется размещение секции ЛСЭ-генератора, конструкция которой представлена на Рис. 2. Прохождение пучка из «ЛИУ» в таком ЛСЭ-генераторе согласно результатам расчетов и предварительных экспериментов, подробно изложенным в [10, 11], должно обеспечить формирование импульсов когерентного излучения с субгигаваттным уровнем мощности вблизи частоты ~ 0.3 ТГц при энергосодержании в импульсе $\sim 10\text{--}100$ Дж. Расчетный электронный КПД создаваемого ЛСЭ-генератора достигает величины 5–6%. Подробно результаты моделирования и технические решения по выбору конструкции секции ЛСЭ представлены в [12, 13]. В настоящее время в указанном диапазоне частот источников с такой мощностью ЭМ-излучения в субТГц-диапазоне не существует, что подчеркивает актуальность решаемой задачи.

3. Неустойчивости сильноточного электронного пучка в ЛИУ, методы повышения его устойчивости

Для обеспечения узкополосного одномодового режима генерации излучения в ЛСЭ при существующих в настоящее время методах селекции мод в электродинамических системах на основе применения модифицированных брэгговских резонаторов и структур типа Тальбо [14, 15], поперечный размер области взаимодействия пучка с волной в резонаторе не должен превышать $30\text{--}50 \lambda$. Исходя из этого, а также учитывая увеличение области, занимаемой пучком внутри резонатора за счет его колебаний в ондуляторном магнитном поле, для эффективной транспортировки пучка в резонаторе требуется обеспечить сжатие его по сечению с исходного диаметра ~ 40 мм до диаметра масштаба 5–10 миллиметров. При этом для получения максимальной эффективности генерации излучения относительный разброс продольных скоростей электронов сжатого по диаметру пучка не должен превышать 10^{-3} . Указанные требования приводят к необходимости изучения различного рода источников возмущения траекторий электронов пучка в ускорителе, а также поиска комплексных мер по подавлению этих возмущений. Необходимо отметить, что подобные исследования неустойчивостей пучков в линейных индукционных ускорителях проводились на действующих ускорительных комплексах мирового уровня [16]: DARHT-II (США), DRAGON (Китай), AIRIX (Франция), но особенности развития неустойчивостей в каждом отдельном ускорителе, как правило, уникальны вследствие зависимости их от параметров работы ускорителя и его конструктивных особенностей.

В связи с этим в большом количестве зарубежных работ рассмотрены различные виды неустойчивостей электронного пучка, возникающие при его ускорении и транспортировке в линейном индукционном ускорителе. Среди наиболее опасных неустойчивостей по своему воздействию на параметры пучка, его динамику и фазовый объем можно выделить поперечную неустойчивость электронного пучка (Beam-Breakup Instability), связанная с возбуждением дипольных мод в ускоряющей структуре ЛИУ [17, 18].

Необходимо отметить, что среди перечисленных неустойчивостей для ЛИУ с большой длительностью импульса тока пучка (более 100 нс) наиболее опасной и разрушительной является именно поперечная неустойчивость, в англоязычной литературе - Beam-Breakup Instability (BBU), поскольку ее развитие приводит к экспоненциальному росту поперечных колебаний пучка вдоль ускорителя и даже к полному обрыву тока [17, 18]. Механизм развития данной неустойчивости обусловлен взаимодействием пучка с собственными электромагнитными колебаниями дипольного типа, возникающими в полостях ускорительных модулей ЛИУ. Вследствие модуляции поперечного движения пучка этими колебаниями их амплитуда, а вместе с ней и амплитуда колебаний центра пучка, быстро нарастают вдоль ускорителя. Следует отметить, что для случая фокусировки пучка

квазинепрерывным магнитным полем, реализованной практически во всех ЛИУ мирового уровня, развитие поперечной неустойчивости пучка описывается приближенным выражением, полученным на основе теории Нила-Купера-Холла [18] в (СИ):

$$\xi_N = \xi_0 \cdot \left[\frac{\gamma_0}{\gamma_N} \right]^{1/2} \exp(\Gamma \cdot N), \Gamma = \frac{I[\text{кА}]k \cdot Q \cdot c}{3 \cdot 10^4} \cdot \left\langle \frac{1}{B[\text{кГс}]} \right\rangle, k = \frac{(\int B_{\perp} dz)^2}{2U},$$

где ξ_N – амплитуда колебаний центроида пучка в N-ом ускорительном модуле, γ_0 – начальный гамма-фактор пучка и γ_N – гамма-фактор пучка в N-ом модуле, I – ток пучка, $\langle B \rangle$ – среднее по длине ускорителя магнитное поле фокусирующей системы, k – коэффициент связи дипольной моды с пучком, Q – добротность моды, B_{\perp} – поперечная компонента магнитного поля моды на оси модуля, U – ее энергия и c – скорость света.

Однако приведенное выражение напрямую не может быть применено для описания развития поперечной неустойчивости пучка в ускорителе «ЛИУ» вследствие применения в нем дискретной фокусирующей магнитной системы, а также других конструктивных особенностей ускоряющей структуры. Для решения этой задачи нами разработан программный комплекс «IRBIS» [19, 20]. Данный код основан на численном решении системы уравнений движения макрочастиц пучка в ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полях ускорителя, а также электромагнитных полях мод ускоряющей структуры, динамика которых описывается уравнениями осциллятора, возбуждаемого током пучка. С помощью этого комплекса были проведены расчеты распространения пучка в тракте ускорителя «ЛИУ» в различных режимах его работы в условиях возбуждения поперечной неустойчивости пучка. Основываясь на выводах теории и результатах моделирования кодом «IRBIS», нами были реализованы на «ЛИУ» следующие методы подавления этой неустойчивости: 1) для уменьшения коэффициента связи мод с пучком были сокращены длины ускоряющих промежутков в ускорительных модулях путем применения электродов, экранирующих область движения пучка от места размещения секционированной ускорительной трубки, 2) уменьшение добротности колебаний в ускорительном модуле за счет применения специально разработанных ВЧ-поглотителей, 3) увеличение среднего магнитного поля фокусирующей магнитной системы «ЛИУ», 4) разнесение по частотам наиболее неустойчивых дипольных мод за счет применения ускорительных модулей двух типов, различающихся геометрией.

В начале расчетов нами были проанализированы частотные спектры и пространственные распределения электрических и магнитных полей дипольных мод двух типов ускорительных модулей «ЛИУ». Пример таких распределений полей на оси модуля для нескольких дипольных мод с наибольшими коэффициентами связи с пучком приведен на Рис.3. Это позволило определить области преимущественной локализации полей этих мод, в которые для уменьшения их добротностей были размещены ВЧ-поглотители. Результаты измерений электродинамических характеристик модуля, оснащенного такими поглотителями, продемонстрировали возможность достижения уровня добротности $Q \sim 10$ для всех наиболее опасных мод. Также в рамках моделирования с помощью комплекса «IRBIS» были определены инкременты поперечной неустойчивости Γ_{th} в различных условиях распространения пучка в «ЛИУ». Пример сравнения теоретического и экспериментального значений инкремента поперечной неустойчивости представлен на Рис.3(б), из которого следует, что разработанный код IRBIS позволяет рассчитывать инкремент поперечной неустойчивости пучка с точностью до 20%. Для сопоставления «ЛИУ» с существующими комплексами мирового уровня введем удельный инкремент Γ' , равный отношению инкремента поперечной неустойчивости к приросту энергии пучка в модуле, который характеризует коэффициент усиления колебаний пучка в расчете на 1 МэВ приращения

энергии. Удельный инкремент в «ЛИУ» в режиме: 1.7 кА/20 МэВ, максимальное поле в линзах 0.27 Тл, достигает значения $\Gamma' \sim 0.3 \text{ МэВ}^{-1}$ в сравнении со значением $\Gamma' \sim 0.52 \text{ МэВ}^{-1}$ для ускорителя DARHT-I (1.7 кА/19.6 МэВ). В проектируемом в США ускорителе нового поколения Scorpius планируется достигнуть $\Gamma' \sim 0.11 \text{ МэВ}^{-1}$ при токе пучка 1.45 кА и энергии электронов 22.4 МэВ [12].

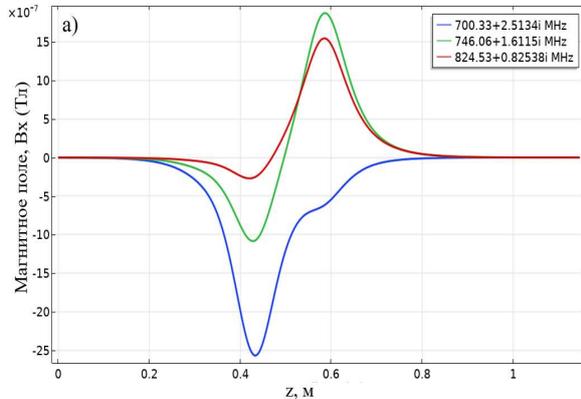


Рис. 3. а) Распределение отличной от нуля поперечной компоненты магнитного поля для трех дипольных мод ускорительного модуля «ЛИУ» на его оси.

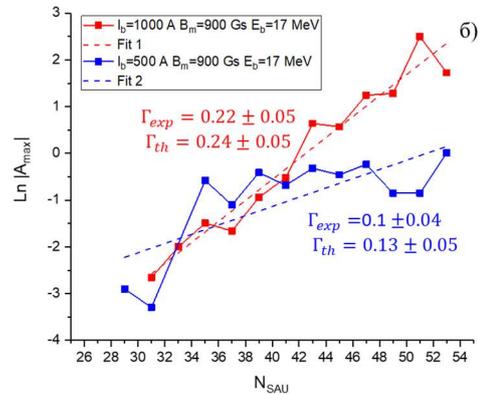


Рис. 3. б) Зависимости логарифма максимальной амплитуды колебаний полей дипольной моды от номера ускорительного модуля в режимах транспортировки пучка с различными токами в одинаковом магнитном поле.

4. Заключение

В ходе теоретических и экспериментальных исследований развития поперечной неустойчивости релятивистского электронного пучка в ЛИУ, определены значения ее инкремента в различных режимах работы ускорителя, а также факторы, влияющие на его величину. В созданном ЛИУ применены известные и новые методы улучшения устойчивости сильноточного пучка. Результаты данных исследований позволили создать уникальный электронный драйвер для проекта ЛСЭ-генератора, который будет реализован в ИЯФ СО РАН в ближайшее время и войдет в перечень мощных источников субТГц и ТГц излучения, создаваемых в нашем институте.

5. Литература

- [1] S.L. Allen, C.J. Lasnier, B. Felker, et al., Generation of high power 140 GHz microwaves with an FEL for the MTX experiment, *Proceedings of International Conference on Particle Accelerators*, Washington, DC, USA, vol. 2, 1551–1553, 1993, doi: 10.1109/PAC.1993.308552
- [2] G.P. Gallerano, A. Doria, E. Giovenale, et al., The physics of and prospects for THz-compact FELs, *Terahertz Science and Technology*, vol. 7(4), p.160, 2014.
- [3] Y.S. Lee, *Principles of terahertz science and technology*. New York: Springer Science & Business Media, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-09540-0
- [4] A.A. Michalchuk, J. Hemingway, and C.A. Morrison, Predicting the impact sensitivities of energetic materials through zone-center phonon up-pumping, *The Journal of Chemical Physics*, **154**(6), 064105, 2021.
- [5] A.A. Michalchuk, S. Rudić, C.R. Pulham, and C.A. Morrison, Vibrationally induced metallisation of the energetic azide α -NaN₃, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **20**(46), 29061–29069, 2018.

- [6] P. Logachev, G. Kuznetsov, A. Korepanov, et al., LIU-2 linear induction accelerator, *Instrum. Experim. Techn.*, vol. **56**(6), 672–679, 2013, doi: 10.1134/S0020441213060195
- [7] D.A. Nikiforov, M.F. Blinov, V.V. Fedorov, et al., High-current electron-beam transport in the LIA5 linear induction accelerator, *Phys. Particles Nuclei Lett.*, vol. **17**(2), 197–203, 2020.
- [8] E. Sandalov, S. Sinitsky, A. Burdakov, et al., Electrodynamic System of the Linear Induction Accelerator Module, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **49**(2), 718–728, 2021, doi: 10.1109/TPS.2020.3045345
- [9] Д.А. Никифоров, Дисс. *Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах.*
- [10] А.В. Аржанников, П.А. Бак, В.И. Белоусов и др., Разработка мощных длинноимпульсных лазеров на свободных электронах субмиллиметрового диапазона на основе ускорительного комплекса «ЛИУ», *Известия ВУЗов: Радиофизика*, **64**(11), 905–916, 2021.
- [11] D.A. Nikiforov, et al., Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source, *JINST*, vol. **16**, P11024, 2021, doi: 10.1088/1748-0221/16/11/P11024
- [12] E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, A.V. Arzhannikov., et al., Kiloampere Electron Beam of a Linear Induction Accelerator as a Driver for a Submillimeter Free Electron Laser, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, vol. **87**, 573–579, 2023, doi: 10.3103/S1062873822701763
- [13] E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, A.V. Arzhannikov, et al., Magnetic System of a Sub-Gigawatt Free-Electron Laser of the Terahertz Range Based on a Kiloampere Beam of Relativistic Electrons, *Radiophysics and Quantum Electronics*, **7–8**, 489–503, 2023, doi: 10.1007/s11141-024-10323-w
- [14] N.Y. Peskov, A.V. Arzhannikov, N.S. Ginzburg, et al., Project of powerful long-pulse sub-THz/THz band FEL: development of selective oversized electrodynamic system, *The 5-th International Conference “Terahertz and microwave radiation: generation, detection and applications” (TERA-2023)*, 54, 2023.
- [15] A.V. Arzhannikov, P. Bak, V.I. Belousov, et al., Development of High-Power Long-Pulse Submillimeter-Wave Free-Electron Lasers on the Basis of the Linear Induction Accelerator Complex. *Radiophys Quantum El*, **64**, 814–824, 2022, doi: 10.1007/s11141-022-10180-5
- [16] G.J. Caporaso, Electron induction linacs. Chapter 7. *Induction Accelerators*, Caporaso G. J., Chen Yu-J., New York: Springer, 117–163, 2011.
- [17] W.K.H. Panofsky, M. Bander, Asymptotic theory of beambreakup in linear accelerators, *Rev. Sci. Instrum*, vol. **39**, 206–212, 1968.
- [18] V.K. Neil, L.S. Hall, R.K. Cooper, Further theoretical studies of the beam breakup instability, *Particle Accel*, vol. **9**(4), 213–222, 1979.
- [19] E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, D.I. Skovorodin, et al., Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL (In Russ.), *Siberian journal of physics*, **17**(2), 16–29, 2022.
- [20] E.S. Sandalov, S.L. Sinitsky, D.I. Skovorodin, et al., Investigation of Transverse Instability of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Linear Induction Accelerator (In Russ.), *Siberian journal of physics*, **17**(1), 5–22, 2022, doi: 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22