

ПРОЕКТ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА

А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, В.А. Кушнир, С.А. Пережогин, Ю.Д. Тур, И.В. Ходак
 ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина
 E-mail: psa@kipt.kharkov.ua

Приводится проект мощного импульсного линейного ускорителя электронов для создаваемого в ННЦ ХФТИ нейтронного источника на базе подкритической сборки. Основным требованием при реализации данного проекта является создание линейного ускорителя электронов с энергией частиц 100...200 МэВ при среднем токе пучка до 1 мА. Приведены результаты расчета характеристик ускоряющих структур и основных систем ускорителя. Представлены результаты моделирования динамики пучка с энергией электронов до 150 МэВ и при средней мощности 100 кВт на выходе ускорителя.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ННЦ ХФТИ разрабатывается проект создания модели энергетической установки при использовании в качестве драйвера импульсного линейного ускорителя электронов. Такая установка состоит из ускорителя S-диапазона, системы транспортировки пучка, нейтронообразующей мишени и подкритической сборки из топливных элементов.

Использование ускорителя в качестве драйвера предъявляет к нему ряд требований. Энергия электронов на выходе ускорителя должна быть в интервале 100...200 МэВ. Это, с одной стороны обеспечивает достаточно большой выход нейтронов, а с другой – объем нейтронной мишени будет достаточно большим для уменьшения плотности энерговыделения и улучшения условий охлаждения мишени. Существующие источники высокочастотного питания ускорителей и инжекторные системы позволяют получить средний ток на выходе такого ускорителя в нужном диапазоне энергии электронов, близкий к 1 мА. Таким образом, средняя мощность в пучке достигает 100 кВт, что выдвигает очевидные требования на поперечные размеры пучка на мишени, связанные как с радиационной стойкостью материала, так и со съемом тепла.

2. РАСПОЛОЖЕНИЕ И СТРУКТУРА УСТАНОВКИ

Линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) будет смонтирован в помещении бункера существующего в ННЦ ХФТИ комплекса линейного ускорителя ЛУ-2000. Такое размещение комплекса не требует значительного объема работ по капитальному строительству и позволит использовать существующую инженерную инфраструктуру ускорителя ЛУ-2000. Имеющиеся мощности позволят осуществить питание всех систем комплекса. Размещение нового оборудования будет проведено после демонтажа существующего оборудования и проведения ремонта помещения. Ускоряющие секции разрабатываемого ускорителя будут расположены после 36-й секции линейного ускорителя ЛУ-2000. Основными элементами ускорительного комплекса (см. Рис.1) являются инжектор электронов (I) и пять ускоряющих сек-

ций (1s-5s) S-диапазона. На первой из секций расположен короткий соленоид (S).

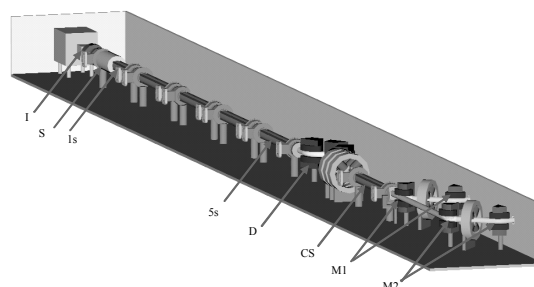


Рис.1. Схема расположения основных элементов ускорителя

После ускоряющих секций располагается система энергетической компрессии пучка (СЭК), состоящая из магнитного дебанчера (D) и компенсационной секции (CS). Непосредственно на выходе ускорителя установлены магнитный анализатор (M1) и дипольный магнит (M2), обеспечивающий поворот электронного пучка в систему транспортировки пучка к мишени. Система СВЧ-питания ускоряющих секций и инжектора базируется на применении шести клистронов SLAC-5045 (производства SLAC, USA) (Рис.2).



Рис.2. Внешний вид источника СВЧ-мощности SLAC-5045

Исходя из расчетов средней энергии электронного пучка со средней мощностью 100 кВт, была выбрана необходимая частота следования импульсов тока пучка и их длительность – соответственно 300 Гц и 3.0 мкс. Стандартные и требуемые пара-

метры СВЧ-сигнала на выходе клистрона приведены в таблице 1. Выбранный нами режим работы клистрона SLAC-5045 с повышенной частотой следования импульсов используется в ряде проектов (см., например, [1]).

Таблица 1

Параметр	Стандартный	Требуемый
Частота СВЧ, МГц	2856	2856
Частота следования имп., Гц	≤ 180	300
Максимальная имп. СВЧ-мощность, МВт	67	28.8
Длительность СВЧ имп., мкс	3.5	3.2
Средняя СВЧ-мощность, кВт	37	30

3. ИНЖЕКТОР

Одним из наиболее важных условий получения минимального энергетического разброса электронов на выходе ускорителя является требование к протяженности и форме электронного сгустка, формируемого в начальной части установки – инжекторе. Группирующая система на нераспространяющихся колебаниях [2] позволяет эффективно формировать сгустки частиц из непрерывного пучка с энергией несколько десятков килоэлектронвольт и ускорять частицы до релятивистских скоростей. Прототипом инжектора для разрабатываемого ЛУЭ является инжектор электронов, разработанный для линейного ускорителя установки “NESTOR” [3].

Для расчета характеристик резонансной и магнитной систем инжектора применялся пакет POISSON/SUPERFISH [4]. Моделирование динамики частиц в резонансной системе группирователя выполнялось с использованием программы PARMELA [5]. Инжектор электронов рассчитан на рабочую частоту 2856 МГц и обеспечивает минимальный фазовый размер сгустков на выходе инжектора при минимальном энергетическом разбросе и токе электронов на выходе до 1.5 А. На Рис.3 представлено пространственное распределение поля и геометрия резонансной системы инжектора.

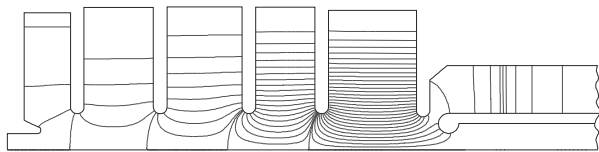


Рис.3. Геометрия резонансной системы и пространственное распределение поля

Моделирование проводилось с учетом сил пространственного заряда для пучка электронов с начальной энергией 25 кэВ и током 1,3 А. Для улучшения радиальных характеристик пучка было применено соленоидальное магнитное поле, наложенное вдоль оси инжектора. В результате моделирования получены следующие параметры пучка электронов на выходе инжектора при токе на выходе 1,1 А: нормализованный эмиттанс (1σ), $\epsilon_{rms}=27 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$; ширина фазового спектра $\Delta\phi=10,8^\circ$ (для 70% частиц);

энергетический разброс $\Delta W/W=3,9\%$, (для 70% частиц); средняя энергия $W_{avr}=995 \text{ кэВ}$; размер пучка $d=1 \text{ мм}$. На Рис.4 представлены результаты численного моделирования динамики электронов в инжекторе.

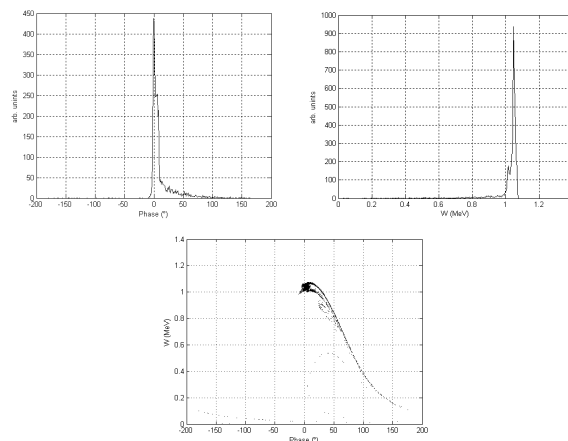


Рис.4. Фазовый энергетический спектр и фазо-энергетическое распределение электронов на выходе инжектора

Как видно из рисунка, электронный пучок имеет небольшое количество частиц на краях фазового распределения. Для достижения высокой моноэнергетичности пучка весьма важным является минимизация количества этих электронов. Известны различные способы формирования коротких электронных сгустков. Один из них основан на использовании преобразования распределения частиц в фазовой плоскости продольный импульс – продольная координата, в неизохронных магнитных системах [6-8]. Подобные группирователи состоят из высокочастотного устройства, обеспечивающего необходимое, близкое к линейному, фазо-энергетическое распределение частиц, и неизохронного устройства, в котором непосредственно осуществляется трансформация этого распределения. В то же время, как видно из Рис.4, фазо-энергетическое распределение на выходе этого устройства далеко от линейного. Расчеты показали, что в данном случае применение неизохронных магнитных систем типа α -магнита или “чикейн” для фазовой компрессии и селекции сгустков является неэффективным.

В связи с этим нами рассмотрена возможность использования принципа, заключающегося в «вырезании» во времени из предварительно сгруппированного пучка части электронов, следующих в малом по сравнению с периодом колебаний промежутке времени [9,10]. При реализации этого принципа пучок взаимодействует с поперечным высокочастотным полем в специальном высокочастотном устройстве – “чоппере”. В результате этого взаимодействия электроны получают поперечный импульс, величина которого зависит от времени. В промежутке дрейфа происходит пространственное разделение частиц. Необходимый для дальнейшего ускорения пучок получают, устанавливая на оси щелевой коллиматор, ширина щели которого и определяет протяженность электронных сгустков. Основным недостатком этого метода, кроме потери интенсивности пучка, является сам факт получения частицами зна-

чительных поперечных импульсов, что приводит к увеличению эмиттанса пучка. Для уменьшения влияния этого фактора (см., например, [11]) после селектирующего элемента устанавливается второй “чоппер”, который компенсирует расходимость частиц, полученную в первом. Предварительные расчеты показали, что в нашем случае использование этой схемы является наиболее приемлемым, поскольку позволяет произвести отсечку периферийных электронов в фазовом распределении при незначительной потере интенсивности пучка. В качестве “чоппера” будет использован цилиндрический резонатор с E_{110} -типом колебаний. При расчетах использовалась модель “чоппера”, заложенная в программу PARMELA.

4. УСКОРЯЮЩИЕ СЕКЦИИ

Ускоряющие структуры ЛУЭ разрабатывались при условии соблюдения двух основных характеристик пучка электронов. Средняя мощность пучка должна составлять 100 кВт при средней энергии пучка 100...200 МэВ. Поэтому, исходя из выбранного типа клистрона и параметров пучка, была выбрана ускоряющая система, состоящая из пяти ускоряющих секций, в которых электронный пучок с импульсным током до 1 А, длительностью импульса 3 мкс и частотой следования 300 Гц должен набрать энергию около 130 МэВ.

Предварительный расчет ускоряющей структуры (геометрические размеры и электродинамические характеристики) проводился на основе справочных данных по круглым диафрагмированным волноводам [12]. Была выбрана однородная регулярная структура S-диапазона на бегущей волне с $2\pi/3$ -типом колебаний длиной 4.3 м. Для всех ускоряющих структур время заполнения ВЧ-мощностью составляет 0.4 мкс. Ускоряющие секции обладают следующими характеристиками: шунтовое сопротивление 46.3 МОм/м; затухание 0.0558 1/м; групповая скорость 0.0327 с; добротность 14300. В расчетах также рассматривались возможные варианты ускоряющих секций для частоты следования импульсов тока пучка 450 и 600 Гц с соответствующим сокращением длительности импульса тока. Результаты расчетов, которые содержат оценку средней мощности пучка на выходе всего ускорителя, приведены в табл. 2.

Таблица 2

$F_{rep.r.}$, Гц	t_{ch} , мкс	P, МВт (на 1-й секции)	W_{total} , МэВ (после 5 секций)	I, А	P_{cp} , кВт
300	3.2	28.8	130.5	0.9	106
450	2.2	27.9	128.6	0.89	103
600	1.7	27.1	126.3	0.88	100

Для улучшения радиальных характеристик пучка на каждой ускоряющей секции будет размещен дублет широкоапертурных квадрупольных линз ($\varnothing = 120$ мм), а на первой секции применен короткий соленоид с магнитным полем 400 Гаусс на протяжении 2 м от начала секции.

Моделирование динамики частиц в ускорителе проведено с использованием программы PARMELA. Результаты моделирования динамики частиц приведены в Табл. 3.

Таблица 3

I_{out} , А	W , МэВ	d, мм	ϵ_{rms} , мм·мрад	$\Delta\phi^\circ$	$\Delta W/W$, %
0.85	132.9				
70% частиц		1.6	21	8	1.9
95% частиц		3.4	21	24	3.7

Для эффективной работы СЭК была сформирована специальная фазо-энергетическая зависимость. На Рис.5 приведены основные фазовые и энергетические характеристики пучка на выходе пятой секции ускорителя.

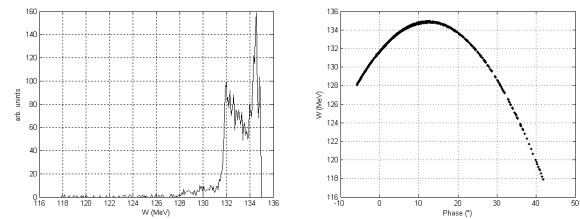


Рис.5. Энергетический спектр и фазо-энергетическое распределение электронов на входе в систему энергетической компрессии

Основное назначение СЭК – уменьшение ширины энергетического спектра пучка для улучшения условий его транспортировки на мишень.

Предварительный расчет СЭК проводился с помощью программы MAD-X [13]. Параметры пучка на выходе пятой секции, полученные в результате моделирования динамики частиц в стационарном режиме, являлись начальными данными для этой программы. В ходе расчетов были определены характеристики магнитов и компенсационной секции. Окончательный расчет СЭК и ускорителя в целом проведен с помощью программы PARMELA. Результаты расчетов параметров пучка на выходе СЭК приведены в Табл. 4.

Таблица 4

I_{out} , А	W , МэВ	d, мм	ϵ_{rms} , мм·мрад	$\Delta\phi^\circ$	$\Delta W/W$, %
0.85	132.8				
70% частиц		1.6	21	16	0.098
95% частиц		3.8	21	41	1

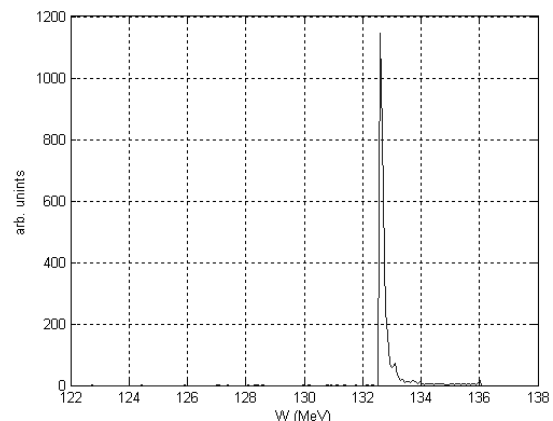


Рис.6. Энергетический спектр электронов на выходе ускорителя

На Рис.6 представлен энергетический спектр пучка электронов на выходе ускорителя. Видно, что СЭК позволяет уменьшить энергетический разброс до 1% при минимальных потерях пучка. Геометрические размеры магнитов дебанчера, расстояние между ними и компенсирующей секцией полностью отвечают конструктивным размерам места, где он будет расположен.

5. МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ ПУЧКА В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ УСКОРЯЮЩИХ СЕКЦИЙ

Известно, что энергетический разброс частиц пучка на выходе ускорителя обусловлен как конечной фазовой протяженностью сгустка, сформированного в начальной части ускорителя, так и переходными процессами. Для сильноточных ускорителей последние, в основном, определяются процессами когерентного излучения сгустков в ускоряющих секциях, что приводит к значительному внутриимпульсному изменению энергии электронов. В настоящее время разработаны различные методы уменьшения влияния этого явления, получившего в литературе название явления токовой нагрузки. Некоторые из них (ΔF и ΔA методы) основаны на изменении фазы и амплитуды сигнала СВЧ-питания ускоряющих секций в течение импульса. Эти методы показали свою эффективность даже в случае ускорителей, содержащих одну или две секции. В многосекционных ускорителях хороших результатов можно достичь при использовании метода “временных задержек” (ΔT метод), суть которого заключается в том, что электронный пучок инжектируется в секцию в момент времени, когда она не полностью заполнена СВЧ-мощностью. Нами проведен расчет, позволяющий оценить эффективность этого метода для разрабатываемого ускорителя. Используя зависимости, приведенные в [14], была разработана программа расчета энергии пучка на выходе многосекционного ЛУЭ. В результате для каждой из пяти ускоряющих секций получены следующие значения задержек: 0.399 мкс, 0.323 мкс, 0.23 мкс, 0.139 мкс, 0.045 мкс. На выходе ускорителя ширина энергетического спектра, обусловленная переходным процессом, равна 0,8%. На Рис.7 показано, как изменяется энергия пучка в течение переходного процесса соответственно по секциям ЛУЭ.

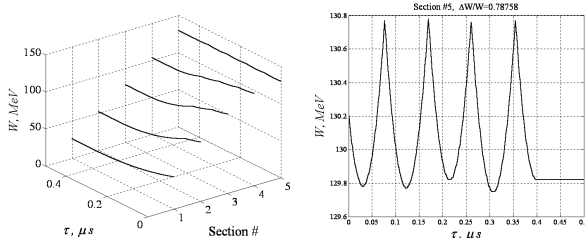


Рис.7. Энергия электронов во время переходного процесса на выходе каждой секции (рисунок справа отдельно для пятой секции)

Как видно из полученных результатов, метод “временных задержек” позволяет существенно уменьшить энергетический разброс частиц в течение времени переходного процесса. Количество этих частиц составляет около 15% от всех частиц пучка, а их энергетический разброс не превышает 1%. Поэтому можно сказать, что интегральный энергетический спектр (по всей длительности токового импульса) будет незначительно отличаться от энергетического спектра в стационарном режиме ускорения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ННЦ ХФТИ проводится работа по созданию мощного импульсного линейного ускорителя электронов для нейтронного источника на основе подкритической сборки. Моделирование динамики электронов в ЛУЭ показывает, что выбранная структура ускорителя позволяет получить электронный пучок с параметрами: $W=132$ МэВ, $\Delta W/W=1\%$ при средней мощности в пучке 100 кВт.

Работа проводится при финансовой поддержке проекта УНТЦ № P233.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.N. Kim, H.S. Kang, J.Y. Choi et al. Pulsed Neutron Source Using 100-MeV Electron Linac at Pohang Accelerator Laboratory // *Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conference*. New York, USA, 1999, p.2593-2595.
2. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, V.A. Kushnir, et al. Bunching systems of electrons on base evanescent waves, PAC'03, Portland, 2003, p.1605-1607.
3. P. Gladkikh et al. “Status of Kharkov X-ray generator based on Compton scattering NESTOR” // *Proceeding of EPAC'04*, Lucerne, Switzerland, 2004.
4. J.H. Billen and L.M. Young. POISSON/ SUPERFISH on PC compatibles // *Proc. 1993 Particle Accelerator Conf.* Washington (USA). 1993, p.790-792.
5. L.M. Young. *PARMELA*: Los Alamos: 1996, с.93 (preprint / Los Alamos National Laboratory, LAUR-96-1835).
6. S. Taeda, T. Hori, K. Tsumori, et al. Bunch compressor for high-current single bunch electron linear accelerator // *Труды XIII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий*. Новосибирск, СССР. 1987, т.1, с.315-318.
7. D. Tronc. New Optical Configurations Making Use of Circular Faces Between Magnetic Sectors // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*. 1985, A240, p.216-220.
8. J.B. Rosenzweig. Monitoring and Manipulation of Sub-Picosecond Beams // *Proc. of the Particle Accelerator Conference PAC'2001*. Chicago, USA. v.1, p.98-102.
9. А.И. Зыков, Г.Д.Крамской, Е.К. Островский, В.А. Вишняков. Формирование электронных сгустков малой фазовой протяженности в инжекторном ускорителе // *Приборы и техника эксперимента*. 1968, №4, с.22-25.

10. R.I. Culter, E.R. Linstrom, S. Penner. Design of a high-current injector for the NIST-NRL free electron laser // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1990, A296, p.710-715.
11. А.С. Алимов, В.Г. Геворкян, Ю.И. Горбатов и др. Физический пуск линии формирования эмиттанса пучка разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ // *Труды 11 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Дубна. 1989, т.1, с.290-292.
12. Диафрагмированные волноводы: Справочник / О.А. Вальднер и др. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергоатомиздат», 1991, с.280 – ISBN 5-283-03960-9.
13. W. Herr and F. Schmidt, M. “A MAD-X Primer”, CERN-AB-2004-027-ABP.
14. Э.Л. Бурштейн, Г.В. Воскресенский. *Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками*. М.: «Атомиздат». 1970, с.191.

PROJECT OF POWERFUL PULSE LINEAR ELECTRON ACCELERATOR FOR THE NEUTRON SOURCE

A.N. Dovbnya, S.G. Kononenko, V.A. Kushnir, S.A. Perezhogin, Yu.D. Tur, I.V. Khodak

The paper presents the project of the powerful pulse electron linac for the subcritical assembly based neutron source that is developed in NSC KIPT. The basic requirement for the realization of the neutron source is the creation of electron linac with energy of particles 100...200 MeV at the average beam current of 1 mA. The results of calculation of performances of accelerating structures and of linac basic systems are considered in the paper. The results of dynamics simulation of the beam with electron energy up to 150 MeV at average power 100 kW on the linac output are presented.

ПРОЕКТ ПОТУЖНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ДЖЕРЕЛА

A.N. Довбня, С.Г. Кононенко, В.А. Кушнір, С.О. Пережогін, Ю.Д. Тур, І.В. Ходак

Представлено проект потужного імпульсного лінійного прискорювача електронів для нейтронного джерела на базі підкритичної збірки, що створюється в ННЦ ХФТІ. Основною вимогою при реалізації даного нейтронного джерела є створення лінійного прискорювача електронів з енергією частинок 100... 200 MeV при середньому струмі пучка 1 mA. Наведено результати розрахунку характеристик прискорюючих структур і основних систем прискорювача. Представлено результати моделювання динаміки пучка з енергією електронів до 150 MeV при середній потужності 100 кВт на виході прискорювача.