

100 кВт ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ С ЭНЕРГИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ 7,5...10 МэВ

*В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов, И.В. Горнаков, Г.И. Кузнецов,
И.Г. Макаров, Н.В. Матяш, Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов, Г.В. Сердобинцев,
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, Б.Л. Факторович, К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*
ИЯФ им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия
E-mail: G.N.Ostreiko@inp.nsk.su

В ИЯФ СО РАН успешно проведены испытания 5 МэВ прототипа нового 100 кВт промышленного линейного ускорителя на энергию электронов от 7,5 до 10 МэВ. Рабочая частота ускорителя 176 МГц, проектный КПД от розетки 26%. В экспериментах получены требуемые средний ток пучка 600 мА и электронный КПД ускоряющей структуры 68%. Экспериментально подтверждено улучшение прохождения электронного пучка и сужение его энергетического спектра благодаря модернизации инжектора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Новый мощный (до 100 кВт) промышленный ускоритель электронов на энергию 7,5...10 МэВ разработан в ИЯФ СО РАН для расширения спектра применения ускорителей типа ИЛУ [1-3]. Модель получила название ИЛУ-14 и может быть использована как в режиме облучения электронным пучком, так и в гамма-моду. Ускоритель унаследовал основные черты серии ИЛУ, такие как внутренний тип инжекции и использование автогенератора в качестве источника ВЧ-мощности, а также содержит ряд особенностей. На базе ИЛУ-14 планируется создание линейки простых и надежных в эксплуатации ВЧ-ускорителей, предназначенных, в основном, для пастеризации широкого спектра продуктов питания и способных оказать конкуренцию существующим промышленным ускорителям в данном диапазоне энергий.

2. КОНЦЕПЦИЯ И БЛОК-СХЕМА ИЛУ-14

На Рис.1 представлена блок-схема мощного промышленного ускорителя ИЛУ-14. Основные элементы ускорителя: ускоряющая структура, триодная электронная пушка, двухкаскадный автогенератор, фидерная система, ВЧ-вводы мощности, модуляторы, система развертки и конвертор (в случае работы ускорителя в гамма-моду).

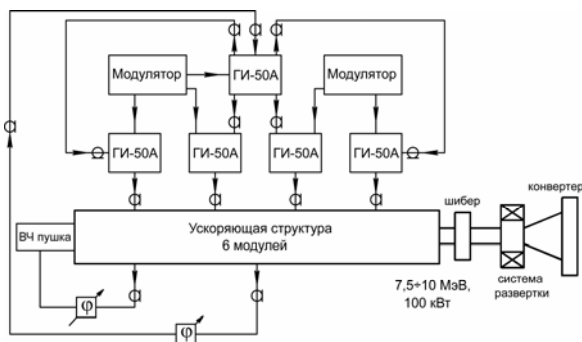


Рис.1. Блок-схема ИЛУ-14

В ускорителе ИЛУ-14 (по сравнению с известными мощными импульсными линейными ускорителями) реализован ряд особенностей.

Первой особенностью ускорителя является то, что в нем для ускорения электронов используется низкочастотная многорезонаторная структура на стоячей волне с резонаторами связи на оси. Структура собирается из отдельных модулей с применением индиевых уплотнений. Модуль содержит полный резонатор связи и два половинных ускоряющих резонатора (см. Рис.2). Ускоряющая структура на энергию электронов до 10 МэВ содержит 6 таких модулей. Структура возбуждается автогенератором на основе мощных высокоэффективных электровакуумных приборов – триодов ГИ-50А, обеспечивающих ускорителю конкурентоспособный КПД от розетки.

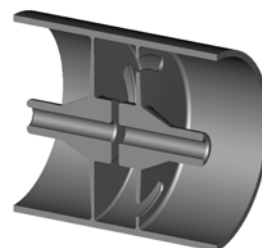


Рис.2. Модуль ускоряющей структуры

Второй особенностью ускорителя на низкой частоте является использование в качестве источника электронов триодной ВЧ-пушки со специально разработанной сеткой с высокой проницаемостью. Пушка помещена непосредственно в первый ускоряющий зазор. Узкий энергетический спектр мощного электронного пучка, необходимый для эффективного преобразования его мощности в гамма-излучение, и проведение пучка через структуру с малыми потерями обеспечиваются благодаря подаче дополнительного ВЧ-напряжения на зазор сетка-катод этой пушки.

Третьей особенностью является применение двухкаскадного генератора с цепью обратной связи, замкнутой через ускоряющую структуру. При этом отпадает необходимость в системе стабилизации частоты ускоряющей структуры или генератора. В результате, существенно упрощаются как генератор, так и система управления ускорителем.

Четвертой особенностью является модульная конструкция ускорителя (отдельные модули собираются из узлов уже проверенных и серийно выпускаемых экспериментальным производством ИЯФ).

Принятая концепция позволяет существенно упростить конструкцию и уменьшить стоимость всего ускорителя, а также повысить его надежность и уменьшить эксплуатационные расходы.

3. УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА

Общий вид шестимодульной ускоряющей структуры показан на Рис.3. Структура работает на частоте 176 МГц в режиме стоячей волны. Связь по магнитному полю осуществляется через щели связи, по две в каждой стенке резонатора. Для предотвращения связи через ячейку, щели в противоположных стенках резонатора связи повернуты друг относительно друга на 90°.

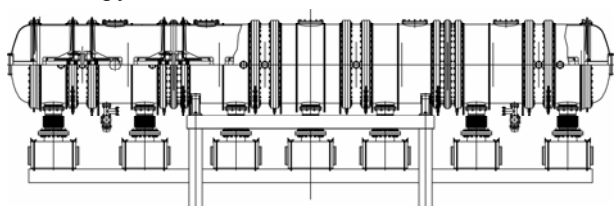


Рис.3. Ускоряющая структура ускорителя ИЛУ-14

Геометрия резонаторов ускоряющей структуры была оптимизирована с помощью программы SuperLANS [4] с целью получения максимальной добротности и минимальной напряженности электрического поля на поверхности. Расчетные электродинамические параметры ускоряющей структуры приведены в Табл.1.

Таблица 1

Рабочая частота, МГц	176
Добротность	22000
Характеристическое сопротивление, Ω	1240
Шунтовое сопротивление, М Ω	27,3
Пролетный фактор	0,986
Коэффициент связи	0,078

4. ИНЖЕКЦИЯ И ДИНАМИКА ПУЧКА

В ускорителе ИЛУ-14 предполагается использовать внутреннюю инжекцию пучка из катодно-сеточного узла, помещенного непосредственно в первый ускоряющий зазор. Конструкция катодно-сеточного узла со щелевой сеткой повышенной пропускной способности аналогична примененной в прототипе ускорителя ИЛУ-12 [5].

Моделирование внутренней инжекции и динамики пучка в ускорителе ИЛУ-14 проводилось в длинноволновом приближении методом макрочастиц с помощью модифицированной программы SAM [6].

Поскольку основной разброс в наборе фаз и скоростей электронов происходит в зазоре сетка-катод, стартовые параметры макрочастиц рассчитывались с помощью 2D-модели ячейки сетки с учетом объемного заряда [5]. Затем проводился 3D-расчет динамики макрочастиц в ускорителе. На Рис.4 кривые 2 показывают результаты расчета формы микроимпульса тока на катоде и на расстоянии 7500 мм от катода. Результаты расчета зависимости энергии от

фазы ускоряющего поля также представлены на Рис.4,а,б (кривые 1).

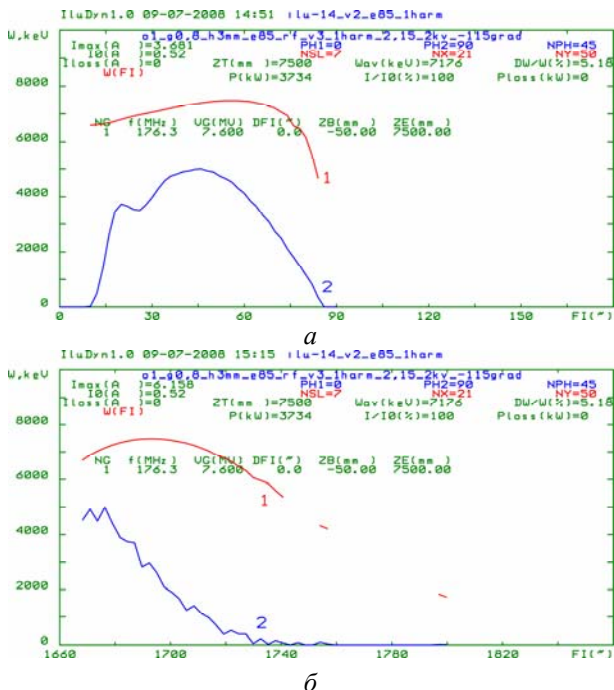


Рис.4. Зависимости микроимпульса тока и выходной энергии электронов от фазы ускоряющего поля: 1 – энергия электронов; 2 – форма микроимпульса тока: а) на катоде; б) на расстоянии 7500 мм от катода

Выходная энергия электронов существенно зависит от фазы ускоряющего поля на катоде. Именно этот факт приводит к необходимости использования добавочного напряжения основной гармоники на зазоре сетка-катод для смещения микроимпульса тока в оптимальную область фаз и сужения энергетического спектра пучка. Представленные на Рис.4 зависимости получены при амплитуде добавочного напряжения 2 кВ и сдвиге фаз 115° от ускоряющего поля. При этом на катод также подается постоянное запирающее напряжение 2,15 кВ. В результате этого r.m.s.-отклонение энергии электронов от средней энергии пучка составляет всего 5,2%. На Рис.5 приведен энергетический спектр электронов на выходе ускорителя при использовании добавочного напряжения основной гармоники с амплитудой 2 кВ на зазоре сетка-катод.

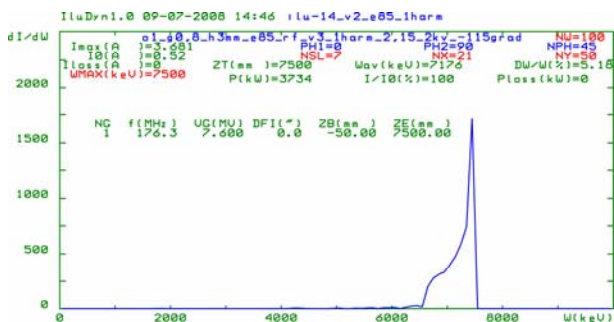


Рис.5. Энергетический спектр электронного пучка на выходе из структуры

На Рис.6 показан вид траекторий электронов в ускорителе ИЛУ-14. Электроны, вылетающие из центра щелей в сетке по нормали к катоду, образуют центральное ядро пучка; вокруг ядра есть заметный

ореол, образованный электронами, вылетающими с краев щелей под углом к нормали. Расчеты показали возможность проведения пучка через ускоритель только за счет увеличения апертуры и эффекта ВЧ-фокусировки.

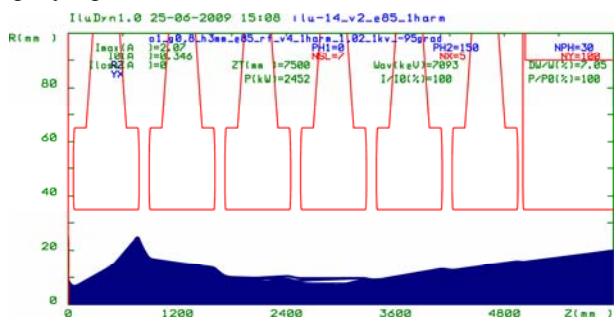


Рис.6. Типичный вид траекторий электронов в УС

На Рис.7 показаны расчетные профили средней за макроимпульс плотности тока.

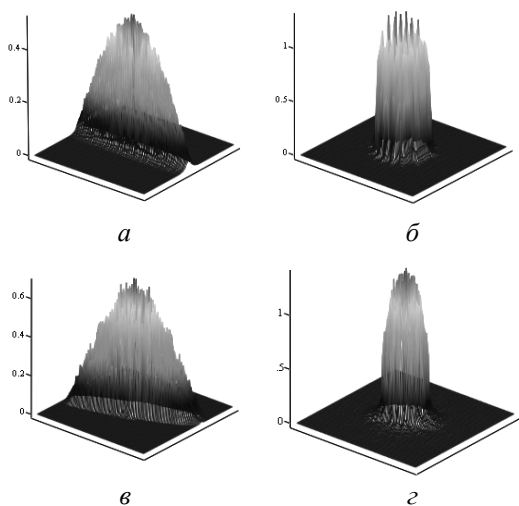


Рис.7. Профили средней плотности тока пучка: на входе во второй ускоряющий зазор (а); на расстоянии 3000 мм от плоскости катода (б); на выходе из ускоряющей структуры (в); после фокусировки магнитной линзой (г)

Из-за разброса поперечных скоростей инжекции только поперек щелей в сетке профиль плотности тока пучка принимает эллиптическую форму на входе во второй ускоряющий зазор (см. Рис.7,а). ВЧ-фокусировка приводит к постепенному устранению этого эффекта (см. Рис.7,б), но при этом происходит перефокусировка крайних частиц (см. Рис.7,в). Этот эффект можно устранить за счет дополнительной магнитной фокусировки пучка в устройстве развертки пучка по мишени (см. Рис.7,г).

5. ПРОТОТИП УСКОРИТЕЛЯ

Используемая модульная конструкция ВЧ-системы и ускоряющей структуры дает возможность сборки ускорителя с заданными параметрами в диапазоне выходных энергий электронов от 5 до 10 МэВ. Для испытания основных узлов и элементов ускорителя был изготовлен и собран в радиационно-защищенном бункере прототип ускорителя на энергию электронов 5 МэВ. Блок-схема прототипа ускорителя приведена на Рис.8.

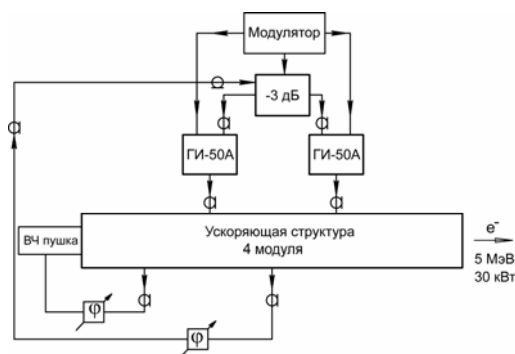


Рис.8. Блок-схема 5 МэВ прототипа ускорителя

ВЧ-система прототипа включает в себя ускоряющую структуру, набранную из четырех модулей (см. Рис.2), триодную ВЧ-пушку, 3 дБ кольцевой мост, два фидера, два ввода мощности и два усилительных каскада на лампах ГИ-50А. Мощность двух генераторов (Рис.9) поступает по двум фидерам длиной 2λ на два ввода мощности и суммируется в ускоряющей структуре (Рис.10). Для организации положительной обратной связи автогенератора часть мощности (~ 300 кВт) отводится из ускоряющей структуры петлей обратной связи, далее проходит через коаксиальную раздвижную фазосдвигающую линию на вход 3дБ кольцевого моста и, поделенная на две равные части, поступает на входы каскадов на лампах ГИ-50А. Модулятор ускорителя ИЛУ-10М [2] обеспечивает амплитуду импульсного анодного напряжения 30 кВ длительностью 450 мкс. Частота повторения импульсов до 50 Гц.



Рис.9. Два генератора с коаксиальными фидерами

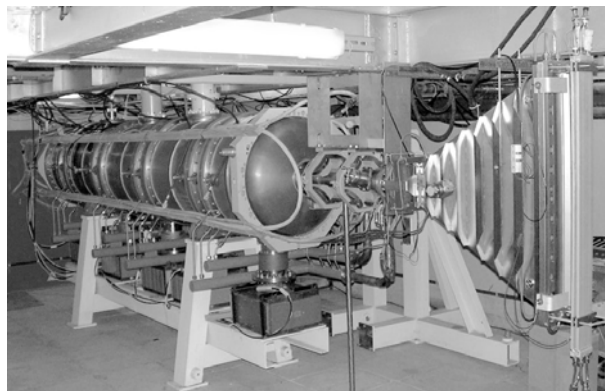


Рис.10. Ускоряющая структура прототипа с системой развертки в бункере

5.1. ИСПЫТАНИЯ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ПРОТОТИПА

Экспериментально частоты связи ускоряющей структуры и ее добротность на рабочем виде колебаний были измерены анализатором ВЧ-цепей (см. Рис.11). Также были проведены измерения относительных величин амплитуд полей рабочей моды в ускоряющих ячейках структуры методом малого возмущения при помощи диэлектрического шарика. Результаты измерений хорошо совпали с результатами 3D-расчетов программой Microwave Studio [8] (см. Табл.1).

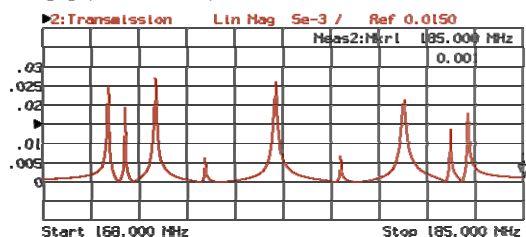


Рис.11. Спектр колебаний рабочей моды

После шестичасовой откачки в ускоряющей структуре получен вакуум $5 \cdot 10^{-8}$ Торр, что является хорошим результатом для непрогретного объема. При частоте следования импульсов (1...25) Гц потребовалось всего 3 часа тренировки для преодоления высокочастотного разряда (мультипактора). На четырехмодульной структуре уровень ускоряющего напряжения 7,5 МВ также был достигнут в течение двух часов. Таким образом, структура, состоящая из шести модулей, будет иметь достаточную электрическую прочность для ускорения электронов до энергии 10 МэВ. В Табл.2 приведены расчетные параметры ускорителя ИЛУ-14 на энергию 7,5 и 10 МэВ мощностью 100 кВт.

Таблица 2

Вариант	1	2
Генераторная лампа	5×ГИ-50А	5×ГИ-50А
Энергия, МэВ	10	7,5
Электронный КПД, %	68	77
КПД от розетки, %	26	30

Далее для работы ускорителя с токами ~ 600 мА была оптимизирована связь ускоряющей структуры с передающими фидерами. При значении постоянной составляющей импульса тока 600 мА и энергии ускоренных электронов 5 МэВ необходима мощность генератора порядка 4 МВт.

5.2. ПРОВЕДЕНИЕ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Для оптимизации проводки пучка через ускоряющую структуру проводились измерения тока пучка с катода и на выходе из структуры, где на расстоянии 1150 мм от выходного фланца ускорителя был установлен цилиндр Фарадея.

Токопрохождение электронного пучка через структуру без подачи ВЧ-напряжения на катод пушки составляет 80%. При подаче оптимального по амплитуде и фазе ВЧ-напряжения на зазор сетка-катод удалось получить импульсный ток с катода 600 мА при коэффициенте прохождения 96%. Это

хорошо согласуется с результатами численного моделирования.

При работе прототипа на большой мощности использовалось выпускное устройство с линейной разверткой пучка вдоль окна с выпуском в атмосферу через титановую фольгу. Пучок сбрасывался на алюминиевый коллектор, охлаждаемый водой. Перед магнитом линейной развертки был установлен дуплет квадрупольных линз для формирования поперечного размера пучка в пределах 20...30 мм на поверхности фольги выпускного окна.

Средняя мощность пучка оценивалась:

а) как произведение средней энергии (которая определялась по результатам измерения спектра электронов пучка) на средний ток коллектора;

б) калориметрическим методом.

При амплитуде импульса ускоренного тока на коллекторе 480 мА (ток инжекции с катода пушки 500 мА), длительности импульса 420 мкс, частоте повторения 33 Гц мощность пучка, измеренная калориметрическим методом, составляла 33 ± 2 кВт. Мощность, рассчитанная по средней энергии и среднему току, $34,2 \pm 1$ кВт. Совпадение удовлетворительное.

5.3. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПУЧКА

Измерение энергии ускоренных электронов производилось с помощью магнитного спектрометра с неоднородным магнитным полем ($n=0,5$), углом поворота 148 градусов и радиусом поворота 200 мм. Ток пучка фиксировался на цилиндре Фарадея, установленном после спектрометра. На входе и выходе из спектрометра расположены взаимно согласованные коллимирующие щели шириной 2 мм. За энергию ускоренного пучка принималось значение, соответствующее максимуму спектрального распределения.

Результаты измерения спектров пучка при токе с катода 300 мА без подачи и с подачей на катод дополнительного ВЧ-напряжения амплитудой 0,7 кВ показывают, что с дополнительным ВЧ-напряжением максимум тока на выходе из спектрометра увеличивается и смещается в область более высоких энергий. Согласно расчетам, это происходит вследствие инжекции микроимпульсов тока пучка в более ранних фазах ускоряющего поля.

5.4. ИЗМЕРЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАЗМЕРА ПУЧКА

Измерение размера пятна пучка на выходе ускоряющей структуры проводилось методом прожигания отверстия в фольге толщиной 0,25 мм. Фольга устанавливалась перед цилиндром Фарадея на расстоянии 1150 мм от выхода из структуры. Время экспозиции пучка на фольге подбиралось таким, чтобы достигнуть режима установившегося тока пучка на цилиндре Фарадея, и составляло около 2 минут.

На Рис.12 показана фольга, прожженная пучком 200 мА. С учетом видимого на фотографиях ореола пучка результаты измерений хорошо совпали с расчетами. Как и предсказывалось в расчетах, пучок

имеет максимальный размер в направлении, перпендикулярном направлению щелей сетки.



Рис.12. След пучка на фольге и катодно-сеточный узел (диаметр сетки 20 мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН успешно прошел стендовые испытания в импульсном режиме прототип мощного промышленного ускорителя электронов. Полученные параметры приведены в Табл.3.

Таблица 3

Максимальное ускоряющее напряжение, МВ	7,5
Максимальный импульсный ток пучка, мА	600
Коэффициент токопрохождения пучка, %	96
Импульсная мощность пучка (при энергии электронов 5 МэВ), МВт	2,5
Длительность импульса, мкс	420
Средняя мощность пучка (при частоте повторения 33 Гц), кВт	33

При частоте повторения импульсов 50 Гц средняя мощность пучка будет 50 кВт.

Результаты испытаний подтверждают возможность создания ускорителя ИЛУ-14 с энергией электронов до 10 МэВ и мощностью в пучке до 100 кВт на основе разработанных модулей. Ускоряющая структура в этом случае должна быть составлена из шести модулей; необходимая ВЧ-мощность обеспечивается сложением в ускоряющей структуре мощности четырех выходных каскадов на лампах ГИ-50А.

Узкий энергетический спектр ускоренных электронов позволяет использовать ускоритель как в электронной, так и гамма-модах, что расширяет область применения в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Л. Ауслендер и др. // *Приборы и техника эксперимента*. 2009, № 3, с.98-103.
2. V.L. Auslender, et al. // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, № 3(47), с.165-167.
3. V.L. Auslender, et al. // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Nuclear Physics Investigations"*. 2008, № 3(49), с.20-24.
4. D. Myakishev, V. Yakovlev // *Proceedings of IEEE Part. Accel. Conf.* 1991, v.5, p.3002-3004.
5. V.L. Auslender, et al. // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: "Nuclear Physics Investigations"*. 2006, № 3(47), с.3-5.
6. М.А. Тиунов, et al. // *Nucl. Instrum. and Meth.* 2006, v. A 558, p.77-88.
7. <http://www.cst.de>.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

100 kW MODULAR LINEAR ACCELERATOR FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS WITH ELECTRON ENERGY OF 7.5...10 MeV

V.L. Auslender, A.A. Bryazgin, V.A. Gorbunov, I.V. Gornakov, G.I. Kuznetsov, I.G. Makarov, N.V. Matyash, G.N. Ostreiko, A.D. Panfilov, G.V. Serdobintsev, V.V. Tarnetsky, M.A. Tiunov, B.L. Factorovich, K.N. Chernov, V.G. Cheskidov

At Budker INP SB RAS, a 5 MeV prototype for a new 100 kW industrial accelerator with electron energy of 7.5...10 MeV has been successfully tested in pulsed operating regime. The accelerator operates at 176 MHz, expected wall plug to electron energy efficiency is 26%. The obtained structure electron efficiency of 68% and electron beam average current of 600 mA are close to the expected values. Improvements of beam transportation and energy spectrum due to modernization of the injection unit are experimentally confirmed.

100 кВт ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ З ЕНЕРГІЄЮ ЕЛЕКТРОНІВ 7,5...10 MeV

В.Л. Ауслендер, А.А. Брязгін, В.А. Горбунов, І.В. Горнаков, Г.І. Кузнецов, І.Г. Макаров, Н.В. Матяш, Г.М. Острейко, А.Д. Панфілов, Г.В. Сердобинцев, В.В. Тарнецький, М.А. Тиунов, Б.Л. Факторович, К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов

В ИЯФ СВ РАН успішно проведені випробування 5 МеВ прототипу нового 100 кВт промислового лінійного прискорювача на енергію електронів від 7,5 до 10 МеВ. Робоча частота прискорювача 176 МГц, проектний ККД від розетки 26%. В експериментах отримано потрібний середній струм пучка 600 мА і електронний ККД прискорювальної структури 68%. Експериментально підтверджено поліпшення проходження електронного пучка і звуження його енергетичного спектра завдяки модернізації інжектора.