

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-200 для комплекса ИРЕН ОИЯИ

А.В. Новохатский, Н.С. Диканский, Б.А. Скарбо, С.В. Шиянков
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

А.М. Долгов, Г.М. Куперман
Российский институт мощного радиостроения, Санкт-Петербург, Россия

В.К. Антропов, С.Н. Доля, А.А. Каминский, А.К. Красных, Э.М. Лазиев,
В.Г. Пятаев, В.Т. Руденко, А.П. Сумбаев, В.И. Фурман, В.А. Швец
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В.А. Сенюков
Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

Установка ИРЕН создается как интенсивный импульсный источник резонансных нейтронов. Так же, как и действующий источник ИБР-30 [1,2], он представляет собой традиционную для ОИЯИ комбинацию из драйвера — линейного ускорителя электронов, и мишени — конвертера с размножающей оболочкой. Пучок ускоренных электронов в конвертере рождает потоки тормозных γ -квантов и фотонейтронов, которые размножаются в окружающей конвертер оболочке из делящегося материала (Pu_{239}). Импульсные потоки нейтронов из мишени используются для спектрометра времяпролетного типа высокого разрешения. Проект разработан с целью сокращения длительности импульса при сохранении высокой средней интенсивности нейтронов для повышения энергетического разрешения спектрометра. При коэффициенте размножения нейтронов ~ 28 и длительности нейтронного импульса 400 нс интегральный выход нейтронов источника составит $\sim 9 \cdot 10^{14}$ н/с [2,3]. Выходные параметры источника ИРЕН обеспечат его конкурентноспособность и перспективность в качестве базовой установки ЛНФ ОИЯИ.

Концепция ускорителя-драйвера ЛУЭ-200 разработана в ИЯФ СО РАН [4]. Проектные параметры ИРЕН по выходу нейтронов задают среднюю мощность пучка электронов ≥ 10 кВт, что при длительности импульса 250 нс, значении тока электронов в импульсе ~ 1.5 А и частоте циклов 150 Гц определяет энергию электронов ~ 200 МэВ. ЛУЭ-200 будет размещен вертикально в двух верхних этажах существующего трехэтажного здания установки ЛУЭ40 — ИБР30 (рис. 1). Ограничения по высоте помещений определяют темп набора энергии в ускоряющих секциях ≥ 35 МэВ/м. Ускоритель состоит из электронной пушки, группирователя, двух ускоряющих секций, источников СВЧ-мощности, систем фокусировки, диагностики, контроля и управления. Пушка, группирователь и первая секция с соответствующим модулятором и клистроном размещаются в верхнем этаже, вторая секция с модулятором и клистроном — этажом ниже. Ускоренный пучок транспортируется в нижний этаж к мишени.

В качестве прототипа источника электронов в проекте использован источник ϕ -фабрики ИЯФ СО РАН — пушка с оксидным катодом, постоянным катодным напряжением 200 кВ и сеточным управлением [4]. Конструкция и система управления пушки адаптированы к генеральной схеме ЛУЭ-200. Источник электронов должен обеспечивать на входе в группирователь пучок с током $1.5 - 2.0$ А в импульсе, эмиттансом 10 п см * мрад в пятне радиусом 4 мм.

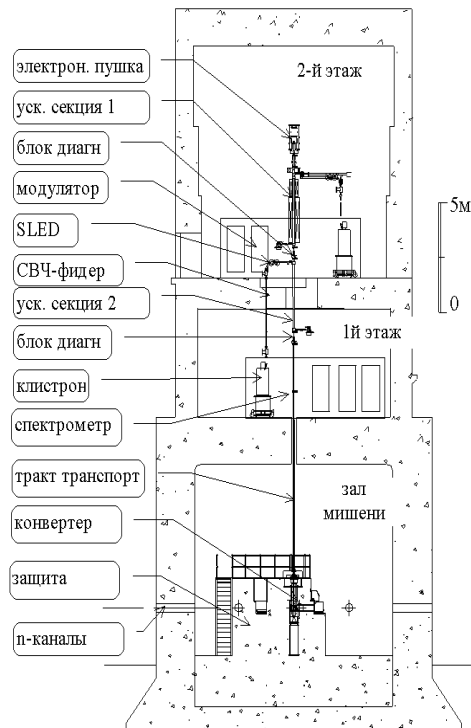


Рис. 1 Схема установки.

Как показывают расчеты [4], эффективность передачи мощности СВЧ в электронный пучок составляет $\sim 15\%$. Это означает, что при средней мощности электронного пучка $\sim 10 \text{ кВт}$ необходимо иметь источник СВЧ с суммарной мощностью $\sim 70 \text{ кВт}$. Указанным требованиям оптимально удовлетворяют импульсные клистроны 5045 SLAC [5]. При частоте повторения, равной 150 Гц , требуемое значение средней мощности позволяют получить два клистроны 5045. Параметры клистроны приведены в табл. 3.

С выхода клистронов СВЧ-мощность $\sim 60 \text{ МВт}$ по прямоугольному вакуумированному волноводу сечением $72 \times 34 \text{ мм}$ поступает в систему умножения мощности (SLED) [4] и далее — в ускоряющие секции. В системе SLED (табл. 4) повышение импульсной мощности осуществляется за счет накопления СВЧ-энергии в накопительных резонаторах с последующим ее переизлучением в секцию. Переброс СВЧ-фазы на 180° осуществляется с помощью быстрого фазовращателя.

Из волноводного СВЧ-тракта первой ускоряющей секции часть мощности отвлекается для питания группирователя. В тракт группирователя вводятся аттенюатор и фазовращатель для регулировки амплитуды и фазы колебаний.

В качестве задающего генератора в МИФИ разработан и создан двухканальный синтезатор с цифровой установкой частоты, мощности в каждом канале и возможностью быстрой ($\leq 15 \text{ нс}$) переброски фазы. Система предварительного усиления и СВЧ-возбуждения клистроны 5045 базируется на клистроне КИУ-37 станции

Таблица 1. Параметры секции.

Рабочий тип колебаний	$2\pi/3$
Рабочая частота	2856 МГц
Длина одной секции	3032 мм
Групповая скорость	0.02 с
Добротность	$1.3 \cdot 10^4$
Шунтовой импеданс	53 МОм/м
Ускоряющий градиент	40 МэВ/м

Таблица 2. Параметры группирователя.

Рабочий тип колебаний	$2\pi/3$
Рабочая частота	2856 МГц
Фазовая скорость волны	0.7 с
Эффективность группировки	60%
Общая длина	243 мм
Входная имп. мощность	110 кВт
Рассеиваемая мощность	8.2 Вт

Ускоряющая структура ЛУЭ-200 состоит из группирователя и двух ускоряющих секций. Секция представляет собой диафрагмированный волновод, состоящий из 85 ячеек. Параметры секции представлены в табл. 1. Группирователем является отрезок такого же волновода, работающий на встречной волне с экспоненциально нарастающим полем. Параметры группирователя приведены в табл. 2.

ОЛИВИН. Уровень и фаза колебаний СВЧ возбуждения регулируются с помощью поляризационных аттенуаторов и фазовращателей.

Таблица 3. Параметры клистрона 5045.

Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность	67 МВт
Длительность СВЧ-импульса	3.5 нс
Частота повторений	≤ 180 Гц
Средняя СВЧ-мощность при частоте повторения 150 Гц	37 кВт
Усиление по мощности	53 – 57 дБ
КПД	43 – 47%
Анодное напряжение U_a	350 кВ
Анодный ток	400 А
Фазовая чувствительность на 1% отклонения U_a	6°
Амплитуд. чувствительность на 1% отклонения U_a	1.5%

Таблица 4. Параметры системы SLED.

Коэффициент умножения мощности	3.8
Коэффициент сокращения длительности СВЧ-импульса	6.5
КПД преобразования	52%
Тепловые потери в резонаторах, относ. мощности на входе	24%
Эффективное увеличение набора энергии	1.9

Фокусировка пучка от пушки до группирователя и в первой секции осуществляется соленоидальным магнитным полем. Основным принципом системы элементов соленоидальной фокусировки является минимизация размеров и углового разброса частиц на входе в каждый последующий элемент. Транспортировка пучка от первой секции до мишени производится с помощью девяти квадрупольных магнитных линз.

Импульсный модулятор М-350 для клистрона 5045 SLAC разрабатывается на базе модулятора М-250 ускорительной станции ОЛИВИН [6]. Ускоряющие секции, группирователь и накопительные резонаторы системы SLED для ЛУЭ-200 разработаны и изготавливаются в ИЯФ СО РАН. Элементы мощных вакуумных волноводных трактов разработаны в МИФИ и изготовлены в НПО “Исток” (Фрязино). Основные агрегаты и функциональные элементы вакуумной системы будут изготовлены фирмой Vacuum-Praha (Чехия). Остальные технологические системы ЛУЭ-200 разрабатываются и изготавливаются в ОИЯИ.

Для экспериментального подтверждения возможности обеспечения проектного значения темпа набора энергии создается полномасштабный испытательный beam-off стенд, включающий основные модули и функциональные системы ускорителя: ускоряющую секцию, клистрон 5045, импульсный модулятор М-350, волноводные тракты, систему SLED, СВЧ-возбудитель, шкаф предварительного усиления, системы контроля, диагностики, управления и синхронизации и др. Программа работы стенда предусматривает исследование модулей и СВЧ-систем, включая испытания узлов и устройств с их паспортизацией перед монтажом на ускорителе.

Модуляторы М-250 и М-350 (табл. 5) представляют собой импульсные схемы с полным разрядом накопителя — формирующей линии (ФЛ) и резонансной зарядкой. Значения напряжения заряда ФЛ у модуляторов отличаются не более, чем на 20%. Значения среднего тока зарядки практически совпадают. Это позволяет после доработки использовать зарядную цепь М-250 в модуляторе М-350. Импульсная мощность в нагрузке М-350 превышает аналогичный параметр прототипа более, чем в два раза.

Таблица 5. Параметры модуляторов.

	М-250	М-350
Импульсная мощность, МВт	65	150
Напряжение на клистроне, кВ	50 – 250	50 – 350
Напряжение на выходе ФЛ, кВ	20	23.5
Ток в импульсе, кА	3.6	6.3
Длительность плато импульса, мкс	8.0	3.5
Фронт импульса, мкс	1.5	1
Срез импульса, мкс	2.7	1.8
Неравномерность плато импульса не более	0.3%	1%
Частота циклов, Гц	до 100	до 150
Суммарная емкость ФЛ, мкФ	1.05	0.7
Волновой импеданс линии, Ом	4	4
Напряжение заряда ФЛ, кВ	40.0	47.0
Средний ток заряда ФЛ, А	4.2	5.0
Мощность от сети, кВА	150	200

Частота следования импульсов и средняя мощность в нагрузке М-350 в полтора раза превышают те же параметры модулятора М-250. Поэтому разрядная цепь модулятора-прототипа существенно переработана. Формирующее устройство состоит из двух ФЛ, заряжаемых от одного источника и разряжаемых одновременно на общую нагрузку — импульсный трансформатор. В каждой ячейке ФЛ последовательно включены два высоковольтных конденсатора ИМК-100-0.05.

Целью стендовых испытаний модулятора М-350 является получение требуемых параметров импульса в нагрузке, воспроизводимости и повторяемости этих параметров. Программа высокочастотных испытаний включает измерение выходной мощности клистрона в зависимости от уровня мощности возбуждения, импульсного анодного напряжения при различных значениях частоты следования импульсов, измерения формы огибающей СВЧ-импульса, амплитудной и фазовой чувствительности клистрона при малых отклонениях параметров режима работы от их номинальных значений. Для модулей ЛУЭ-200 перед их монтажом на ускорителе выполняется цикл “холодных” радиотехнических измерений на низком уровне СВЧ-мощности: определение добротности и полного сопротивления, комплексного коэффициента передачи и времени заполнения секций, частотной и температурной зависимости указанных параметров, коэффициента умножения мощности в системе SLED. Измерение ускоряющего градиента в структуре ускорительной секции будет осуществляться по энергетическому спектру электронов темнового тока в секции.

Список литературы

- [1] Frank I.M. Particles and Nucleus. Vol 1, Part 2, Dubna 1972, p. 805-860.
- [2] Aksenov V.L. et al. Proposal For The Construction Of New Intense Resonance Neutron Source (IREN), E3-92-110, JINR, Dubna, 1992.
- [3] IREN Project. Intense Resonance Neutron source. Compiled by A.K. Krasnykh, V.L. Lomidze, A.V. Novokhatsky, Yu.P. Popov, W.I. Furman. Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, 1994.
- [4] Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN). A. Novokhatsky et al. In Proceedings of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory, p. 197, D1,9,13-93-459, Dubna, 1994, p. 197-211.
- [5] Allen M. et al. Performance of The SLAC Linear Collider Klystrons. SLAC-PUB-4262, March 1987.
- [6] Куперман Г.М. и др. Импульсный модулятор М-350 для клистрона 5045 SLAC. С-Петербург, 1995 (не опубликовано).