

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 623.384.65

КОМПАКТНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ

© 1998 г. В. Л. Ауслендер, В. Е. Балакин, А. В. Булатов,
С. В. Воробьев, В. В. Колмогоров, В. В. Леонов, Г. С. Крайнов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск 90, просп. Акад. Лаврентьева, 11

Поступила в редакцию 29.04.98 г.

Приведены основные характеристики компактных ускорителей электронов прямого действия, работающих на частоте 20 кГц и выше. Описаны особенности ускорителей мощностью до 32 кВт, перекрывающих диапазон энергий от 250 кэВ до 1 МэВ.

Развитие техники преобразователей частоты и промышленный выпуск высокочастотных выпрямительных столбов (КЦ108В, 2Ц121) стимулировали создание серии компактных ускорителей, работающих на частоте 20–50 кГц. Компоновка узлов этих ускорителей принята аналогичной компоновке ускорителей ЭЛВ [1]. Каскадный генератор ускоряющего напряжения с индуктивной связью и параллельным питанием каскадов представляет собой систему идентичных соединенных последовательно выпрямителей. Последние взаимоиндукцией связаны с общей первичной обмоткой. Все выпрямители собраны по схеме с умно-

жением напряжения на 2 или 4 (см. рис. 1, где n – число каскадов).

Удельная мощность в первичном контуре трансформатора пропорциональна запасаемой в контуре удельной энергии и частоте питающей сети. Часть этой мощности, определяемой коэффициентом индуктивной связи между контурами 1 и 2 трансформатора, можно передать в нагрузку. Очевидно, что при заданных размерах ускорителя, отбираемую мощность можно наращивать за счет увеличения частоты. При этом одновременно с ростом частоты растет добротность первичного

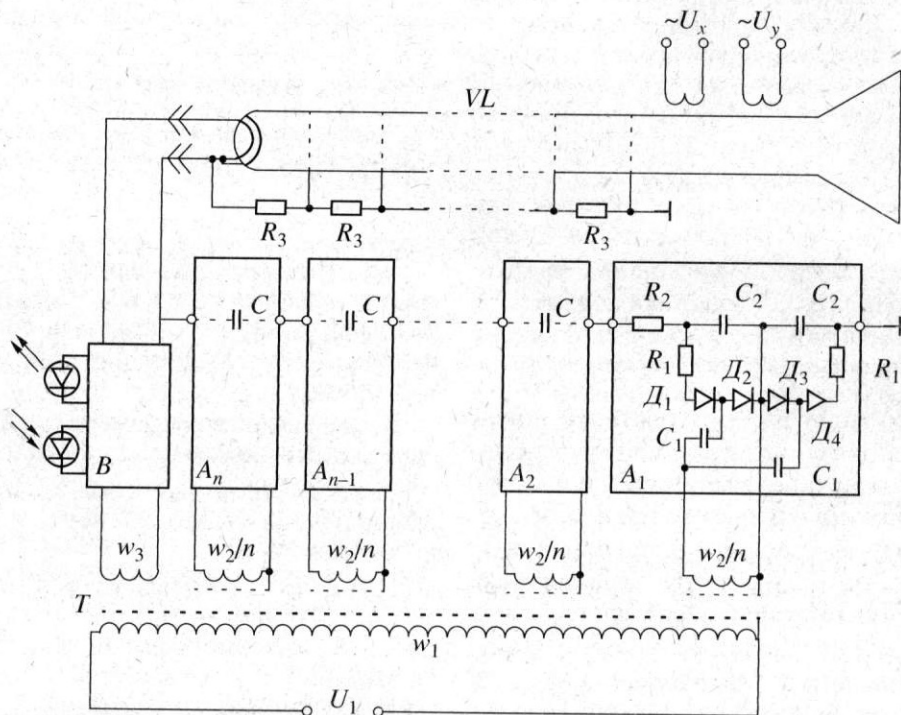


Рис. 1. Электрическая схема ускорителя HFELV.

Характеристика	Тип ускорителя		
	HFELV-2	HFELV-3	HFELV-4
Энергия max, МэВ	0.5	1.0	1.0
Мощность, кВт	16	16	32
Выпускное окно, мм	75 × 980	75 × 980	75 × 980
Рабочее положение	Вертикальное	Вертикальное	Горизонтальное
Объем сосуда, м ³	0.11	0.155	0.24
Давление газа, МПа	1.2	1.2	1.2
Кратность умножения напряжения	2	4	4
Масса, кг	240	240	560
К.п.д.	0.85	0.87	0.87
Габаритные размеры, мм	1600 × 1920 × 540	1600 × 1980 × 540	2500 × 1320 × 980
Число каскадов	60	48	96
Напряженность электрического поля в зазоре, кВ/см	135	150	140

контура, что существенно повышает к.п.д. ускорителя.

Особенности описываемых ускорителей: увеличена в 20–50 раз (до 20–50 кГц) частота питания по сравнению с существующими ускорителями этого типа; выпрямительные каскады собраны по схеме с умножением на 2 или 4 переменного напряжения, причем учетверение напряжения поднимает градиент напряжения по выпрямительным каскадам с 10 до 14 кВ/см; удельная объемная мощность источника ускоряющего напряжения достигает 130 кВт/м³; в системе развертки пучка электронов применен магнит доворота пучка, позволяющий работать с углами развертки >60° без увеличения потерь на фольге выпускного окна; в качестве главной изоляции служит сжатый азот с 5–10%-ной добавкой элегаза, который не используется повторно, поэтому в составе оборудования отсутствует система для перекачки и сжижения элегаза; малый (~1%) разброс энергии электронов из-за небольшого коэффициента пульсации выпрямленного напряжения.

В таблице приведены основные характеристики рассматриваемых ускорителей, отличающихся друг от друга только конструкцией генератора ускоряющего напряжения и длиной изолятора ускоряющей трубки, остальное оборудование идентично.

Сдвоенный ускоритель питается двумя блоками, в которых расположены тиристорные преобразователи частоты.

Размеры и объем генератора ускоряющего напряжения определяются энергией электронов и ограничиваются: электрической прочностью газовой изоляции, необходимым коэффициентом (0.5–0.75) индуктивной связи между контурами,

максимально допустимым градиентом напряжения вдоль оси ускорителя. Если первые два условия можно считать заданными, то третье представляет возможности уменьшения размеров генератора ускоряющего напряжения.

В существующих ускорителях со встроенной в генератор ускорительной трубкой градиент напряжения ≤10 кВ/см, он ограничивается конструкцией выпрямительных каскадов (секций). Многократное увеличение частоты питания позволяет применить выпрямительные схемы с умножением напряжения на 4, что разгружает катушки каскадов по напряжению и позволяет поднять градиент до 14 кВ/см.

Генератор ускоряющего напряжения с индуктивной связью представляет собой систему последовательно соединенных выпрямителей, которые при помощи взаимоиндукции связаны с общей первичной обмоткой трансформатора T (рис. 1). При расчете таких генераторов каскадное включение выпрямителей можно заменить одним эквивалентным выпрямителем с суммарным напряжением U_2 , у которого число витков вторичной обмотки w_2 равно сумме витков всех обмоток выпрямителей (секций). Нагрузкой в схеме замещения, эквивалентной ускорительной трубке, служит переменное сопротивление, определяемое выражением,

$$R_n = U_0 / (I_0 m^2) = R_n / m^2, \quad (1)$$

где U_0 – ускоряющее напряжение, I_0 – ток пучка электронов, R_n – сопротивление нагрузки, m – кратность умножения напряжения.

В схеме каскадного генератора трансформатор без магнитопровода через диоды заряжает

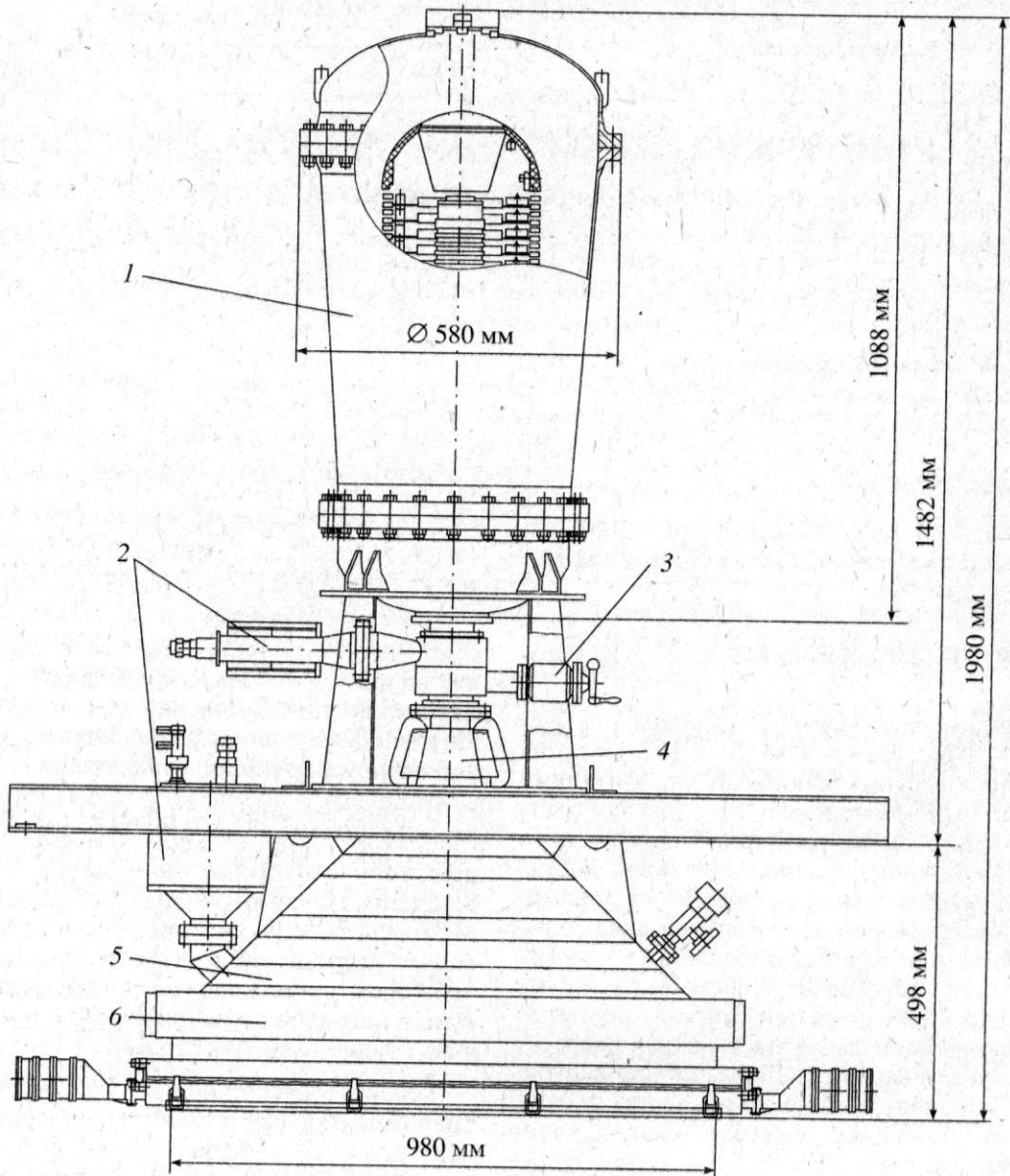


Рис. 2. Общий вид ускорителя HFELV-3. 1 – сосуд высокого давления, 2 – вакуумный насос, 3 – шибер, 4 – развертка, 5 – выпускное устройство, 6 – доворотный магнит.

цепочку из n емкостей с эквивалентным значением C/n , к которой подключена нагрузка R_n . Элементом, ограничивающим снимаемую мощность, является индуктивность рассеивания трансформатора (в [2, 3] рассмотрено влияние индуктивности в зарядной цепи выпрямителя). Выражение для среднего тока вторичной обмотки трансформатора для значений $U_2/e_{2m} < 0.5$ имеет вид

$$I_2 = mI_0 = \frac{2}{\pi(1-k^2)\omega L_2} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi U_2}{2e_{2m}}\right)^2}, \quad (2)$$

где U_2 – суммарное напряжение обмоток выпрямителей (секций) под нагрузкой, e_{2m} – суммарная

электродвижущая сила взаимной индукции при холостом ходе всех обмоток выпрямителей (секций), L_2 – суммарная индуктивность каскадов (секций), k – коэффициент индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками.

Для граничного значения $U_2/e_{2m} = 0.537$, при котором длительность импульсов тока через диоды достигает максимального значения, равного π/ω , выражение для среднего тока упрощается

$$I_2 = \frac{2}{\pi(1-k^2)\omega L_2} U_2. \quad (3)$$

Максимальная мощность, передаваемая в нагрузку, будет при $U_2/e_{2m} \approx 0.5$. При падении

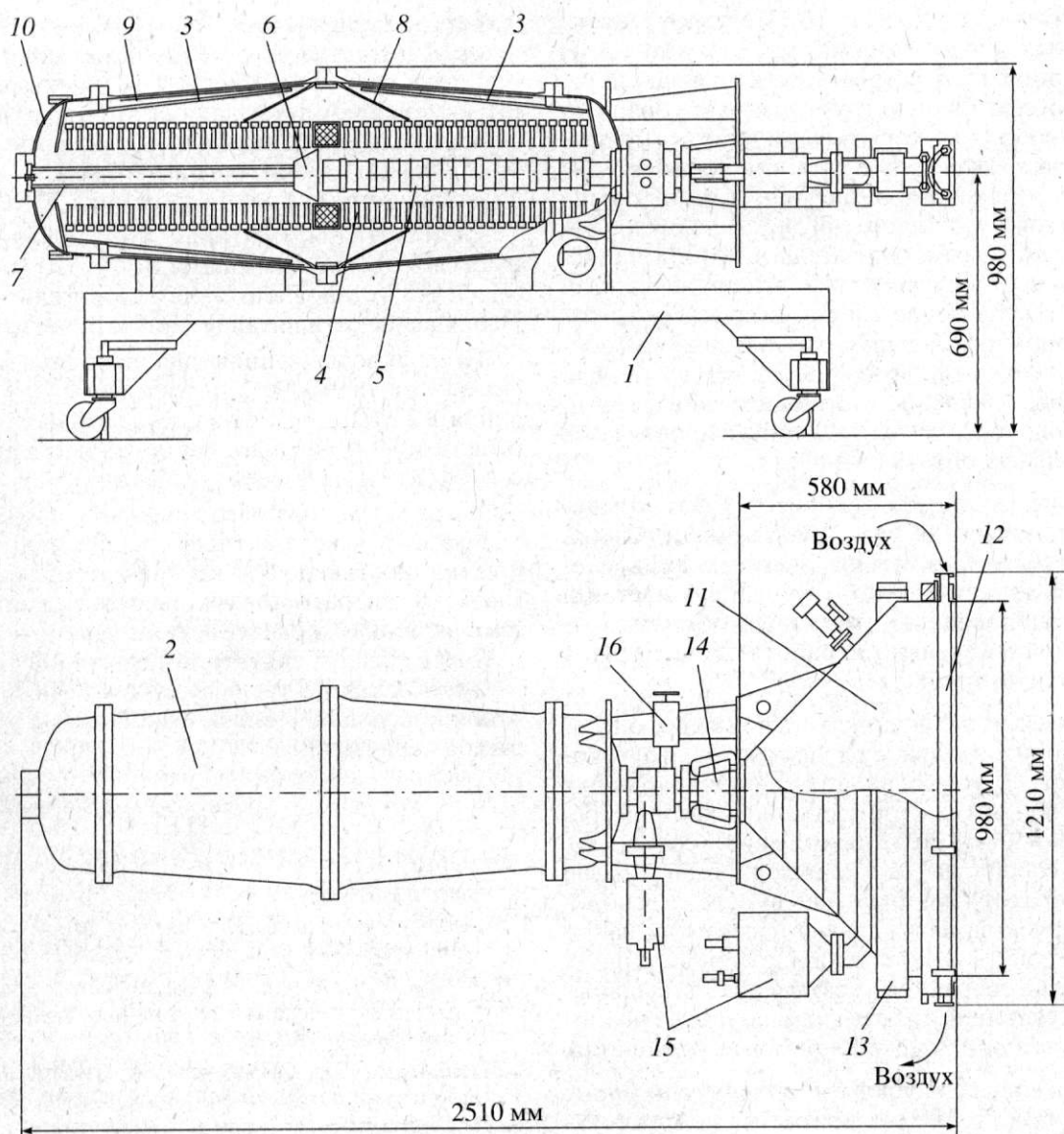


Рис. 3. Конструкция ускорителя HFELV-4. 1 – несущая платформа, 2 – сосуд под давлением, 3 – первичная обмотка, 4 – выпрямительные секции, 5 – ускорительная трубка, 6 – блок управления, 7 – световод, 8 – поддерживающий изолятор, 9, 10 – магнитопроводы, 11 – выпускное устройство, 12 – выпускное окно, 13 – доворотный магнит, 14 – развертка, 15 – вакуумные насосы, 16 – шибер.

напряжения под нагрузкой до уровня 0.537 от холостого хода мощность P_2 равна

$$P_2 = 0.64 \frac{U_2^2}{(1 - k^2)\omega L_2} \quad (4)$$

При известных значениях $U_2 = U_0/m$, R_n , $\omega = 2\pi f$ из (3) определяется требуемая суммарная индуктивность каскадов (секций) L_2 . После этого легко вычисляются все остальные параметры трансформатора.

Используя выражения для энергии $W_{2m} = \Psi_{2m} I_{2m} / 2$, запасемой во вторичном контуре, и индуктивности $L_2 = \Psi_{2m} / I_{2m}$ выражение (4) можно

преобразовать (здесь $\Psi_{2m} = w_2 \Phi_{2m}$ – потокосцепление, Φ_{2m} – магнитный поток вторичного контура). Поскольку переменное напряжение U_2 под нагрузкой имеет прямоугольную форму, для него справедливо выражение

$$U_2 = \frac{2}{\pi} \omega \Psi_{2m} \quad (5)$$

Тогда, подставляя значение U_2 и L_2 в (4), получим

$$P_2 = \frac{0.52}{1 - k^2} \omega W_{2m} \quad (6)$$

Ускорители мощностью 16 кВт по компоновке основных узлов подобны ускорителям ЭЛВ (рис. 2). Они имеют встроенную в каскадный генератор ускорительную трубку, экранированную от магнитного поля короткозамкнутыми медными кольцами. Выпускное устройство имеет две развертки. Основная развертка, отклоняющая пучок на угол $\pm 45^\circ$ с частотой 50 Гц, снабжена доворотным магнитом, снижающим потери на выпускном окне. Выпускное окно имеет две фольги. Дополнительная более тонкая фольга предохраняет от соприкосновения с обрабатываемой средой основную титановую фольгу, нагруженную атмосферным давлением. В щели между фольгами высоконапорным вентилятором продувается воздух, охлаждающий обе фольги.

Удвоение мощности ускорителя дает компоновка, показанная на рис. 3. Сдвоенный генератор ускоряющего напряжения имеет охлаждаемую водой первичную обмотку из двух частей и две секционированные вторичные обмотки, соединенные параллельно и работающие на одну ускорительную трубку.

Преимущества сдвоенного исполнения описаны в [4]. Горизонтальное расположение оси ускорителя достигается креплением выпрямительных каскадов (секций) каждой вторичной обмотки тремя изоляционными стержнями к днищу сосуда. Ускоритель собран на передвижной раме. Правая часть генератора напряжения вместе с ускорительной трубкой, вакуумными насосами и выпускным устройством жестко прикреплена к раме. Левая часть генератора установлена на выдвижные направляющие полозья рамы и может по ним откатываться при осмотре и ремонте устройства.

Ускорительная трубка имеет рабочую длину 660 мм, диаметр 89 мм, снабжена электронной

пушкой с LaB_6 -катодом $\varnothing 6$ мм. Блок управления пушкой питается от отдельной катушки вторичной цепи трансформатора. Ток пушки регулируется изменением тока накала катода с помощью двух оптоэлектронных пар, управляемых с пульта. Изолятор трубки состоит из 5 секций. Материал изоляционных колец – керамика 22ХС.

Пост питания, контроля и управления размещается в стойке размерами 570 × 570 × 1600 мм. Здесь же установлен преобразователь частоты. Напряжение сети питания 3 × 380 В, частота 50 Гц.

Пост газоснабжения для заполнения сосуда смесью азота (90–92%) и элегаза (8–10%) до давления 1.2 МПа состоит из двух газовых баллонов объемом 40 л каждый. Габаритные размеры поста 290 × 500 × 1800 мм, вес 220 кг.

Разработаны и подготовлены к производству три варианта компактных ускорителей с удельной мощностью до 130 кВт на 1 м³ объема, занимаемого генератором ускоряющего напряжения. Рассчитанные характеристики ускорителей подтверждаются результатами испытаний выпрямительных секций, а также результатами моделирования поведения электрической схемы ускорителя под нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будкер Г.И., Гапонов В.А., Корабельников Б.М. и др. // Атомная энергия. 1976. Т. 40. Вып. 3. С. 216.
2. Альбертинский Б.И., Свиньин М.П. Каскадные генераторы. М.: Атомиздат, 1980. С. 58.
3. Кныш Б.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. Л.: Энергоиздат, 1981. С. 18.
4. Грищенко А.И., Корабельников Б.М., Крайнов Г.С. и др. Препринт № 79-54. Новосибирск: ИЯФ, 1979. С. 3.