

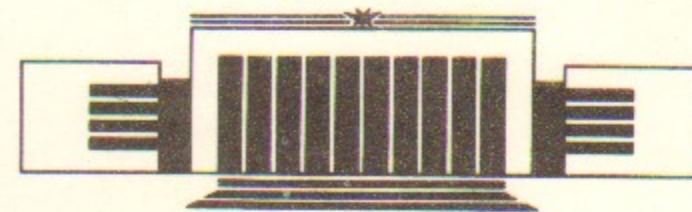


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.Ф. Булушев, Ю.Д. Валяев, Н.С. Диканский,  
И.В. Казарезов, Л.Г. Самойлов

**КАСКАДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ ПУЧКОВ  
(200 — 600 кэВ)**

ПРЕПРИНТ 90-79



НОВОСИБИРСК

Каскадные генераторы для ускорения  
электронно-ионных пучков  
(200—600 кэВ)

А.Ф. Булушев, Ю.Д. Валяев, Н.С. Диканский,  
И.В. Казарезов, Л.Г. Самойлов

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Описываются особенности схемного решения, конструкция и результаты испытаний каскадных генераторов с емкостной связью, выполненных в двух типоразмерах на напряжение 200—600 кэВ и использованных для ускорения электронов и ионов с токами до 5 мА в пучке.

Развитие экспериментальных методов и технологий с использованием высокоэнергетичных электронных и ионных пучков [1, 2] стимулировало работы по созданию малогабаритных и надежных источников высокого напряжения (ИВН), в частности, каскадных генераторов с последовательной емкостной связью [3], как важнейшей функциональной части ускорителей прямого действия.

Каскадные генераторы с последовательной емкостной связью (КГЕС) на сравнительно малые напряжения (до 1 мВ) и токи (до 10 мА) имеют ряд преимуществ перед генераторами других типов:

— отсутствие подвижных механических частей, как у генераторов Ван-де-Граафа;

— отсутствие магнитопровода и катушек высокого напряжения с их относительно сложной технологией и неудобствами сочетания такой конструкции с требованиями высоковольтного исполнения.

Недостатки КГЕС:

— необходимость использования источников повышенной частоты средней мощностью до нескольких киловатт;

— зависимость внутреннего сопротивления генератора от числа каскадов и, соответственно, выходного напряжения от нагрузки при заданном числе каскадов («падающая нагрузочная характеристика»);

— необходимость эффективной защиты элементов схемы, при частую неизбежных пробоях высоковольтной нагрузки — до недавнего времени ограничивали их широкое применение.

Существенный прогресс в разработке элементной базы высоковольтных накопителей энергии с повышенной удельной энерго-

емкостью [4] и высоковольтных вентилях, способных работать на повышенных частотах, а также создание тиристорных и специально разработанных транзисторных питающих генераторов повышенной частоты [2] в значительной мере способствовали проведению работ по созданию малогабаритных КГЭС.

Ниже описываются особенности схемного использования, конструкция и результаты испытаний малогабаритных ИВН, выполненных по принципу генераторов каскадного типа с последовательной емкостной связью.

### КАСКАДНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИОННОГО ИСТОЧНИКА 500 кэВ

#### Схемное решение

Из всего многообразия схемных решений КГЭС [3] предпочтительнее было отдано однофазной двухполупериодной циклической схеме благодаря возможности однотипного выполнения всех каскадов и лучшим качественным показателям ее работы (меньшая величина пульсаций и слабая зависимость внутреннего сопротивления генератора от числа каскадов).

После анализа и экспериментальной отработки принята схема (рис. 1) имеющая некоторые отличия от приведенной в [3]:

- последовательно в диодную цепь, соединяющую емкости двух повышающих колонн, включены дополнительно резисторы (см., например,  $D_{11}-R_{11}$ ,  $D_{12}-R_{12}$ ,  $D_{13}-R_{13}$ ,  $D_{14}-R_{14}$ , секция 1); номинал резисторов определяется экспериментально — в зависимости от параметров используемых диодов, напряжения каскада и емкости колонны;

- диодно-резисторные сборки, попарно соединяющие между собой начала и концы противостоящих емкостных колонн, имеют общую точку, присоединяемую к эквипотенциальному экранирующему кольцу, окружающему секцию-каскад, что обеспечивает экранирование элементов секции от внешних электрических полей.

В емкостных колоннах описываемой схемы отсутствуют обычно применяемые для защиты от пробоев ограничивающие резисторы [5, 7], так как их использование, наряду с повышением устойчивости к пробоям, имеет ряд неудобств:

- при разных зарядных токах, в зависимости от номера каскада, имеют место разные потери в резисторах; а при выборе номи-

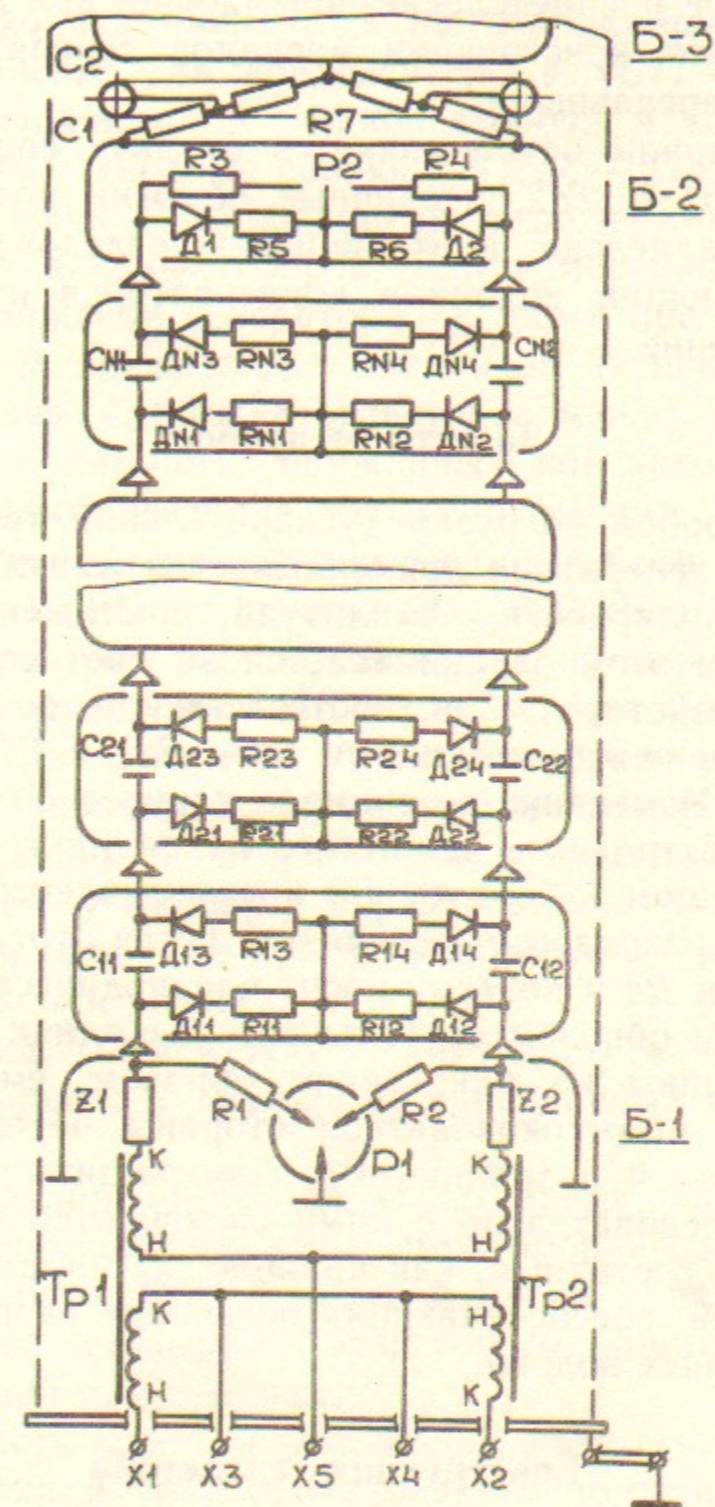


Рис. 1. Принципиальная схема каскадного генератора для питания источника на 600 кВ.

налов резисторов — в зависимости от номера каскада [5], создается неравномерное распределение напряжения при пробоях,

— усложняется конструкция каскадов генератора, их нельзя выполнить универсальными.

Питание колонны осуществляется от двух повышающих трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$ , первичные обмотки которых соединены встречно и параллельно, а вторичные — последовательно, подключены к повышающим колоннам конденсаторов и имеют противофазное напряжение.

### Защита от пробоев

В случае пробоя нагрузки (ускорительной трубки) к высоковольтной части генератора прикладывается импульс обратной (отрицательной) полярности. Амплитуда приложенного к колонне напряжения при этом ограничивается за счет секционированного демпферного резистора  $R7$  и, соответственно, делителя на емкостях  $C2$  (емкость между каскадами  $B3$  и  $B2$ ) и  $C1$  (емкость каскада  $B2$  на бак). Изменение потенциала корпуса  $B2$  вызывает срабатывание трехэлектродного защитного разрядника  $P2$ , присоединенного общим концом к корпусу  $B2$  и двумя электродами к емкостным колоннам; разряд осуществляется через ограничительные сопротивления  $R3$  и  $R4$  и поэтому носит апериодический характер.

Аналогичным образом срабатывает разрядник  $P1$ , закорачивая емкостные колонны на бак; таким образом, емкостная колонна закорачивается с высоковольтной стороны через разрядник  $P2$ , резистор  $R7$ , бак и разрядник  $P1$ . Для защиты трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$  последовательно с ними включаются комплексные элементы  $Z1$  и  $Z2$ , состоящие, как правило, из параллельно соединенных  $R-L$  цепей, обеспечивающих погасание разрядника  $P1$  после разряда емкостных колонн.

### Конструкция генератора

Конструирование генератора велось с учетом следующих предпосылок:

- генератор состоит из однотипных блоков-каскадов;
- увеличение рабочего напряжения на выходе осуществляется наращиванием каскадов;
- при необходимости выравнивания продольного градиента напряжения следует предусмотреть возможность установки между колоннами корректирующих индуктивностей.

На рис. 2 представлена конструкция отдельного каскада выпрямителя. Монтаж элементов каскада выполнен в эквипотенциальной плоскости кольца — экрана 2 на изоляционной плате 3, на которой установлены: два конденсатора 4 ( $C11-C12$ , рис. 1) с контактными площадками 5 с одной стороны и контактными пружинами 6 с другой; диодные сборки 7 ( $D11-D14$ , рис. 1) в количестве четырех штук с добавочными резисторами 8 ( $R11-R14$ , рис. 1) по числу диодных сборок. Для измерения величины выпрямленного напряжения генератора на плате предусмотрена установка резистора 9, являющегося элементом активного делителя на полное напряжение. Стыковка резисторов между собой в колонну осуществляется с помощью пружинных контактов (на схеме не показано). На плате имеются четыре отверстия 10 для изолированных стоек, стягивающих секции в единый блок.

Конструкция КГЭС на напряжение 600 кВ и ток 5 мА представлена на рис. 3. Она выполнена из секций-каскадов в количестве 20 штук. Генератор расположен на днище бака 1; в нижней части колонны располагаются повышающие трансформаторы 2, закрытые сверху экраном 3. Четыре изоляционные стойки 4 проходят через все секции 5 выпрямителя и стягивают их в единую колонну. Шаг между секциями определяется мерными втулками 6, зазор по газовой изоляции при этом определяется величиной постоянного напряжения на каскаде.

Соединение каскадов между собой осуществляется с помощью контактных площадок и пружин 7, укрепленных с разных сторон конденсатора 8.

Последняя секция примыкает к выходному блоку 9, принадлежащему емкостной колонне; в нем смонтирован полукаскад выпрямителя (рис. 1, блок  $B-2$ ), защитная схема с разрядником  $P2$  и секционированный демпферный резистор 10, защищающий колонну от перенапряжений при пробоях.

В верхней части колонны установлен блок 11, предназначенный для формирования и управления электронно-оптической системой ускорителя [2].

Конструкция выпрямителя в целом размещена в баке, состоящем из двух частей: нижней 12 и верхней с патрубками 13.

Внутри бака установлены экраны 14, обеспечивающие требуемую чистоту поверхности.

В качестве изолирующей среды используется элегаз ( $SF_6$ ) под давлением 0,6—0,8 мПа; перед заполнением необходимо произвести вакуумную сушку конструкции.

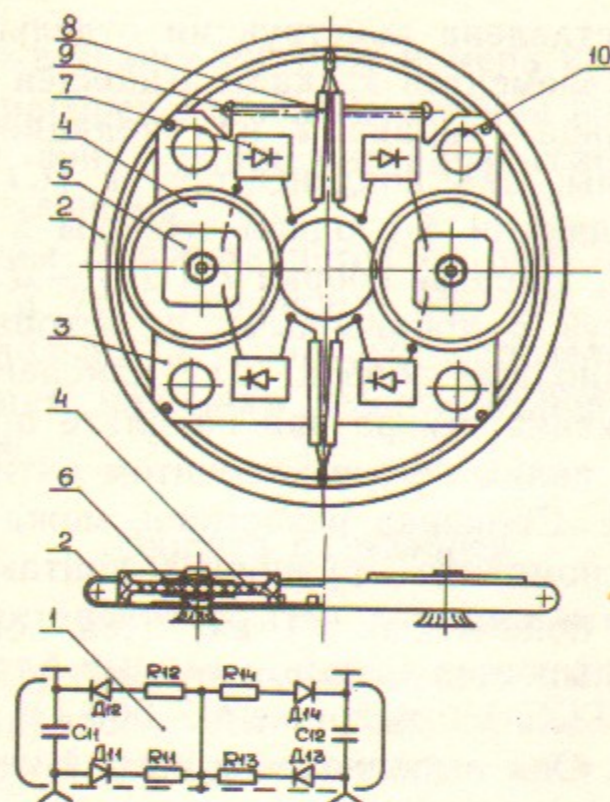


Рис. 2. Конструкция отдельного каскада генератора на 600 кВ.

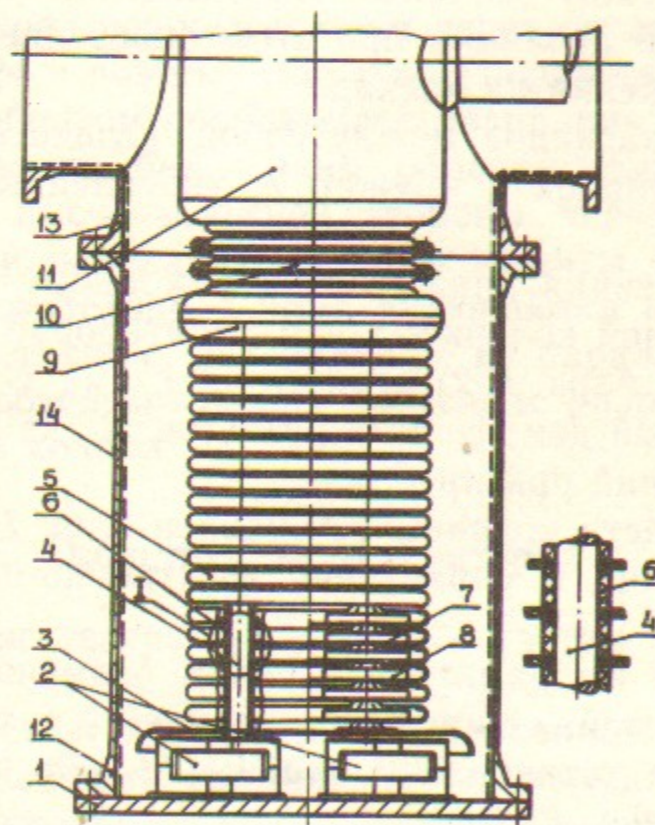


Рис. 3. Конструкция каскадного генератора на напряжение 600 кВ.

Параметры и характеристики генератора приведены в приложении. Питание КГЭС осуществляется от специально разработанного малогабаритного высокочастотного источника питания [2] (разработка В.М. Боровикова) с рабочей частотой  $F_p = 20 \div 25$  кГц и мощностью приблизительно  $\sim 700$  Вт.

Габариты блока питания  $480 \times 240 \times 80$  мм.

Питание блока управления ионным пучком, расположенного под высоким потенциалом, осуществляется от аналогичного высокочастотного источника через разделительный трансформатор [2, 6] на полное напряжение. Такой способ питания позволяет регулировать в широких пределах мощность цепи управления вне зависимости от величины выпрямленного напряжения.

#### МАЛОГАБАРИТНЫЙ КАСКАДНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ НА 200 кэВ

Для проведения исследований в области электронной технологии потребовался малогабаритный источник электронного пучка на энергию 200 кэВ, с током до 5 мА, со сравнительно малой продолжительностью включения (не более 5 минут).

Генератор высокого напряжения для указанного источника разрабатывался с учетом имеющегося опыта с введением некоторых изменений.

Схема источника пучка приведена на рис. 4. Отличие указанной схемы от представленной на рис. 1 заключается в следующем:

— использован единый повышающий трансформатор для обеих зарядных колонн, индуктивность намагничивания трансформатора  $L_m$  за счет введения в магнитопровод зазора выбрана такой, чтобы компенсировать емкостную составляющую тока, протекающего через колонны;

— для питания цепей накала катода под высоким напряжением использован дополнительный понижающий трансформатор  $Tr2$ .

В случае необходимости можно выравнивать продольный градиент напряжения вдоль колонны за счет изменения индуктивности первичной обмотки трансформатора  $Tr2$  (вводя зазор в магнитопровод или меняя соответственно  $W1$  и  $W2$ ).

Регулирование мощности накала осуществляется с помощью высоковольтного переключателя, позволяющего переключением дополнительных сопротивлений, установленных параллельно в цепи

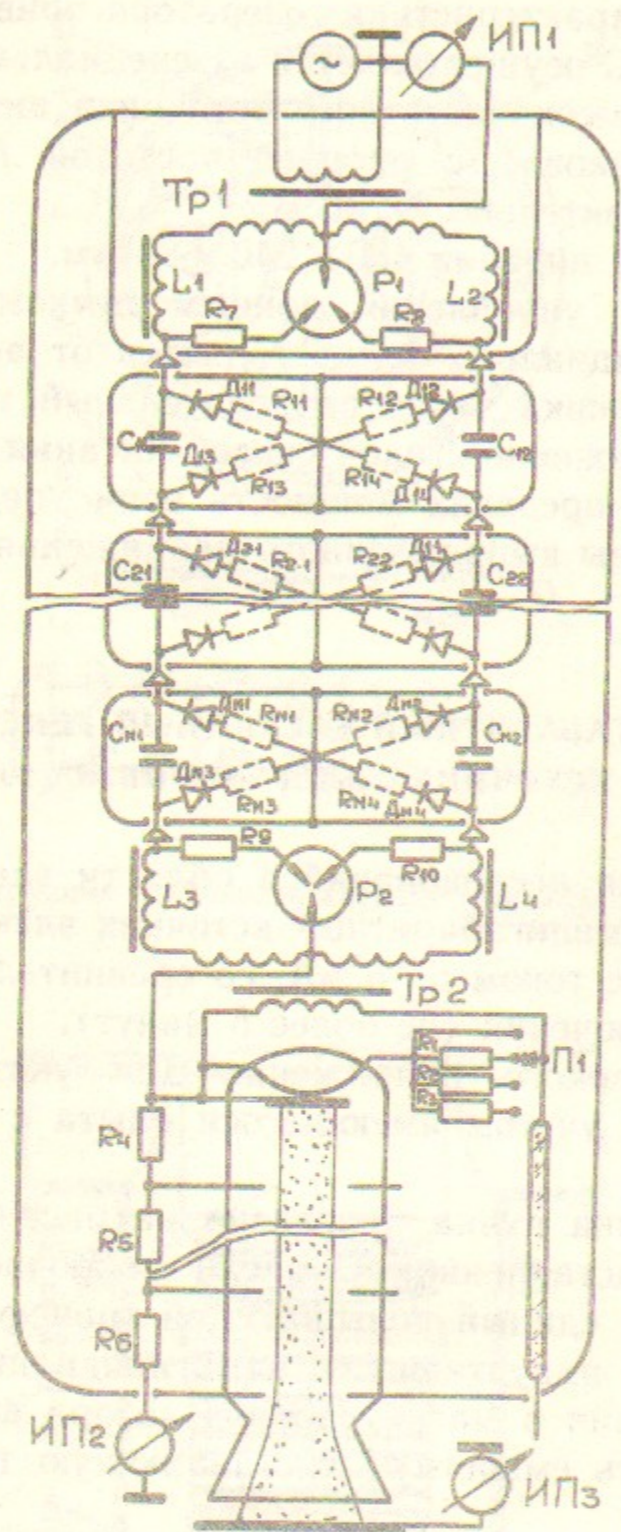


Рис. 4. Схема источника электронов с каскадным генератором на напряжение 200 кВ.

накала пушки или за счет переключения числа витков вторичной обмотки изменять в нужных пределах мощность, рассеиваемую в подогревателе катода.

В схеме отсутствует встроенный высоковольтный делитель для измерения высокого напряжения. Напряжение измеряется с помощью делителя, расположенного параллельно ускорительной трубке (УТ), обеспечивающего равномерное распределение напряжения по секциям УТ и утечку тока с ее электродов. Показания приборов  $ИП_1$  (измеряет средний ток выпрямителя) и  $ИП_2$  (ток резистивного делителя  $R_1 - R_n$  и ток утечки электродов) одинаковы при отсутствии тока пучка, появление последнего фиксируется прибором  $ИП_3$  (ток пучка) и возрастанием тока  $ИП_1$  на величину тока пучка.

Погрешность измерения напряжения высоковольтным делителем, обусловленная токооседанием на электроды, легко учитывается сравнением режима холостого хода (токооседание близко к нулю) и режима работы с пучком.

Приведенная схема реализовывалась на несколько иной элементной базе, чем ранее изложенная. В качестве элементов емкостной колонны использовались конденсаторы К15-10-2200/31,5 кВ — по одному или по два параллельно в каждом звене колонны.

В колонне 12 каскадов. Использование двух конденсаторов позволяет уменьшить внутреннее сопротивление источника, но увеличивает запасенную энергию как в рабочих емкостях, так и конструктивных элементах, что может сказаться на надежности работы конструкции.

В качестве вентилях использовались диоды КЦ-106Г — по 2-3 последовательно. В диодной цепи каскада с одним конденсатором отсутствует ограничительное сопротивление; экспериментально проверено, что короткое замыкание конденсатора, заряженного до 20 кВ непосредственно на диодную цепь через пробиваемый зазор (количество пробоев 200 штук) не вызывает выхода диодов из строя.

Высоковольтные обмотки трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$  выполнены секционированными: каждая обмотка состоит из четырех секций, между обмотками используется газовая изоляция.

Диаметр колонны первого генератора 110 мм, второго 145 мм, длина колонны 230 мм. Обе конструкции каскадного генератора прошли отработку, наладку и были использованы для проведения физических экспериментов в режиме ограниченной продолжительности включения (~5 минут).

Продолжительность включения определялась требованиями эксперимента, с одной стороны, и перегрузками по среднему току и теплу начальных каскадов генератора, с другой.

Номинальному напряжению 200 кВ на нагрузке при токе 5 мА соответствовало напряжение холостого хода 250 кВ на колонне в схеме с одной емкостью; в схеме с двумя емкостями — 225 кВ.

Таким образом, проведенная работа показала, что используя современную базу комплектующих элементов можно создавать надежные малогабаритные источники высокого напряжения.

### Приложение

#### 1. Габаритные размеры каскадного генератора конструкции рис. 3.

Высота всей конструкции	1320 мм.
Диаметр бака внутренний	520 мм.
по патрубкам	756 мм.
Диаметр секций-каскадов	320 мм.
Количество секций-каскадов	20 шт.
Шаг установки секций	25 мм.

#### 2. Рабочие параметры и характеристики каскадного генератора.

Напряжение рабочее ненагруженного (ток < 1.0 мА) выпрямителя	600 кВ.
Напряжение рабочее нагруженного (ток = 5.0 мА) выпрямителя	490 кВ.
Напряжение испытательное (10—15 мин) выпрямителя	700 кВ.
Напряжение отдельной секции:	
рабочее	30 кВ.
испытательное (10—15 мин)	40 кВ.
Высоковольтный трансформатор:	
напряжение рабочее (амплитудное)	15 кВ.
напряжение испытательное (амплитудное)	20 кВ.
Частота рабочая генератора питания	18—22 кГц.
Крутизна спада нагрузочной характеристики	20—22 кВ/мА.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. — М.: Высшая школа, 1988.
2. Ускорительный технологический комплекс / Авдиенко А.А., Булушев А.Ф., Боровиков В.М., Диканский Н.С. и др. — Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986.
3. Альбертинский Б.И., Свиньин М.П. Каскадные генераторы. — М.: Атомиздат, 1980.
4. Блохина Г.П., Дукаревич Н.Я. и др. Ситаллы с высокой диэлектрической проницаемостью и конденсаторы на их основе. — Диэлектрики: Межведомственный научный сборник. Из-во Киевского университета., 1972, вып.2, с.58—64.
5. Широков В.Г., Пуйдо Г.А. и др. Портативный рентгеновский генератор. Авт. свид. № 851809.
6. Валяев Ю.Д., Казарезов И.В., Кузнецов В.И., Останин В.П. Малогабаритный высокочастотный разделительный трансформатор для питания устройств, расположенных под высоким потенциалом. — Препринт ИЯФ СОАН СССР, 89-160. Новосибирск, 1989, 25 с.
7. Pressured 1 MeV Electron Accelerator for Electron Microscopy / G. Reinhold, J.L. Savary, K. Trumphy et al. — Electron Microscopy. Roma, 1968, v.1.

А.Ф. Булушев, Ю.Д. Валяев, Н.С. Диканский,  
И.В. Казарезов, Л.Г. Самойлов

**Каскадные генераторы для ускорения  
электронно-ионных пучков  
(200 — 600 кэВ)**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 6.07.90 г.  
Подписано в печать 17.07.90 г. МН 02416  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 79

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.