

УДК 537.533

## Новый класс мощных электронных приборов – электронно-лучевые вентили

В. И. Переводчиков, В. Н. Шапенко, В. Ф. Мартынов,  
П. М. Стальков, А. Л. Шапиро

Государственное унитарное предприятие "ВЭИ им. Ленина", Москва, Россия

*Рассмотрен новый класс электронных приборов – электронно-лучевые вентили (ЭЛВ). Принцип формирования электронного потока в ЭЛВ с торможением на аноде позволил разработать приборы с новыми качественными характеристиками. ЭЛВ эффективно используются для формирования импульсов большой длительности (миллисекунды и секунды) или осуществляют быстросействующее защитное отключение (единицы микросекунд). Приведены результаты разработок электронно-оптических систем и конструкций на их основе трех типов ЭЛВ. Даны характеристики приборов и определены перспективы дальнейших разработок.*

Электронно-лучевые вентили – новый класс электронных приборов, разработанных в ВЭИ. ЭЛВ является основным элементом импульсных источников электропитания, предназначенных для технологических установок, ускорителей и мощных радиотехнических устройств. С помощью ЭЛВ можно формировать импульсы большой длительности (миллисекунды и секунды) или реализовать быстросействующее защитное отключение (единицы микросекунд). Для эффективного использования ЭЛВ должен иметь следующие характеристики:

внутреннее сопротивление – десятки–сотни Ом при коммутируемом токе 1–100 А в постоянном режиме;

высокое коммутируемое напряжение (100–200 кВ);

вольт-амперную характеристику с минимальным наклоном в рабочей области (пентодную);

мощность рассеивания на аноде от десятков кВт до 1 МВт.

Наиболее сложно выполняемым условием является обеспечение малого внутреннего сопротивления и большого предельного тока при значительном расстоянии от ускоряющей сетки до анода, что определяет коммутируемое напряжение  $U_{\text{ком}}$ . Можно ввести некий параметр качества высоковольтных

коммутирующих приборов  $K = \frac{U_{\text{ком}}}{R_{\text{вн}}}$ . Чем больше значение  $K$ , тем выше

качество прибора.

Условия высокого качества выполняются в ЭЛВ за счет принципиально нового подхода к формированию электронного потока – укоренения его за счет высокого потенциала сетки с последующим торможением в области анода. При этом электронный поток тщательно формируется в луч. Пентодная вольт-амперная характеристика создается за счет низкой проницаемости сетки.

На рис. 1 представлено распределение потенциала в традиционном триоде и в ЭЛВ при двух значениях потенциала сетки (глубина торможения электронного потока на аноде).

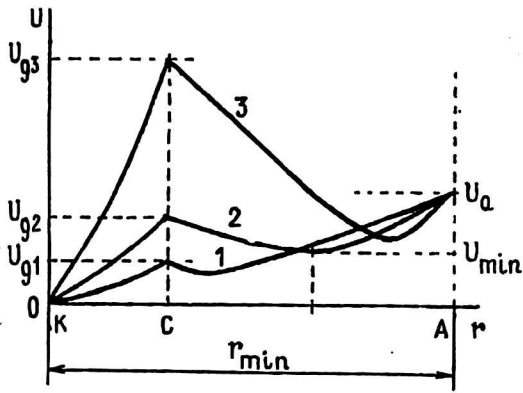


Рис. 1. Распределение потенциала вдоль оси симметрии приборов:  
1 — традиционный триод;  
2, 3 — ЭЛВ при двух значениях  $U_a/U_c$

Из сравнения этих характеристик видно, что провисание потенциала, определяемое большим пространственным зарядом электронного пучка при высоком значении  $U_c$ , в ЭЛВ меньше, а отбираемый с катода ток существенно выше, чем в случае традиционного триода при одинаковом напряжении на аноде  $U_a$ . Расчеты предельного тока для идеального цилиндрического триода без торможения [1] показали, что значение предельного тока  $I$  возрастает, а внутреннее сопротивление  $r$  падает при росте отношения потенциала сетки  $U_c$  к анодному  $U_a$  и определяется количественно:

$$\frac{I}{I_1} = \frac{r_1}{r} = \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{U_a}{U_{y3}}}\right)^3}{8\left(\frac{U_a}{U_{y3}}\right)^{3/2}}, \quad (1)$$

где  $I_1$  — ток при  $r_1$  — внутреннем сопротивлении в условиях  $U_a = U_c$ .

Из рис. 2, на котором представлено графическое решение (1), следует, что предельный ток может быть в 10 раз выше для случая  $U_a/U_c = 0,1$ .

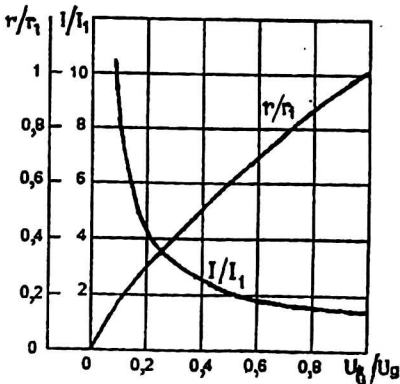


Рис. 2. Зависимость относительных значений внутреннего сопротивления и тока от  $U_a/U_c$

Электронный коэффициент полезного действия коммутирующего прибора может быть определен как отношение коммутируемой мощности, т. е. мощности, выделяемой на нагрузке  $P_{ком} = U_{ком}I_a$  к мощности потерь. Последняя

характеризуется потерями на ускоряющей сетке в аноде. Как было показано в [2], электронный КПД определяется соотношением  $F$ :

$$F = \frac{U_c I_c + U_a I_a}{U_{\text{ком}} I_a} = \frac{U_c I_c}{U_{\text{ком}} I_a} + \frac{U_a}{U_{\text{ком}}},$$

где  $\frac{I_c}{I_a}$  — потери тока на сетке;

$\frac{U_a}{U_{\text{ком}}}$  — относительный уровень анодного напряжения;

$\frac{U_c}{U_{\text{ком}}}$  — относительный уровень сеточного напряжения.

Учитывая, что в ЭЛВ для обеспечения большого предельного тока требуется относительно высокий потенциал сетки, необходимо обратить особое внимание на минимизацию потерь тока на сетке, так как к прямому перехвату тока добавляются электроны, отраженные от анода. Разработка ЭОС с минимальными потерями и торможением пучка возможна в двух направлениях: первое — использование полого анода, близкого по форме цилиндру Фарадея, второе — создание системы с торможением электронов на аноде полем, эквипотенциалы которого ортогональны траекториям электронов пучка, падающих на анод (плоский анод).

Основываясь на этих двух подходах в ВЭИ, разработаны три типа ЭЛВ.

**ЭЛВ 200/1.** Параметры прибора: ток 2 А в постоянном режиме, коммутируемое напряжение 200 кВ.

Прибор предназначен для использования в высоковольтных источниках питания пылеулавливающих электрофильтров в электронно-лучевой технологической аппаратуре. В этих применениях требуется относительно малая величина тока при высоком коммутируемом напряжении.

Эти требования позволяют использовать ЭОС с полым анодом, где достаточно легко обеспечить задержку вторичных и отраженных электронов. Вход в такой анод имеет малое сечение по сравнению с применяющей поверхностью. Предельный ток при положительном потенциале анода определяется образованием виртуального катода в этой области.

На рис. 3 представлена схема электродов ЭОС ЭЛВ 200/1. Катод плоский, цилиндрический 1, около катода расположена крупно-структурная сетка 2 под высоким потенциалом, которая рассекает поток на три сектора. Для уменьшения потерь электронов на сетке, вблизи катода, устанавливается маска 3, повторяющая форму сетки при потенциале, равном катодному.

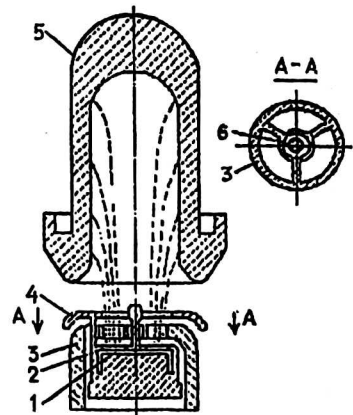


Рис. 3. Схема электродов ЭОС ЭЛВ 200/1

Для снижения удельной нагрузки на анод 5 электроны пучка отклоняются на цилиндрическую поверхность анода полем штыря 6, расположенного на оси и имеющего катодный потенциал. Малый уровень отраженного от анода тока достигнут за счет введения за сеткой защитного электрода 4 с катодным потенциалом.

Критический потенциал анода, соответствующий образованию виртуального катода с резким ростом тока на сетке, составляет 30 % от потенциала ускоряющего электрода при первеансе пучка  $6 \text{ мкА/В}^{3/2}$  ( $U_c = 5,5 \text{ кВ}$ ;  $I_k = 2 \text{ А}$ ). Конструктивно ЭЛВ 200/1 выполнен в виде металлокерамического отпаянного прибора с встроенным магниторазрядным насосом.

На рис. 4 представлено семейство вольт-амперных характеристик ЭЛВ, из которых следует: потери тока на сетке при токе катода 2 А составляют ~ 2 % при глубине торможения 30 % и первеансе пучка  $6 \text{ мкА/В}^{3/2}$ , т. е. совпадает с расчетным; наклон вольт-амперной характеристики не превышает  $30 \text{ мА/кВ}$ .

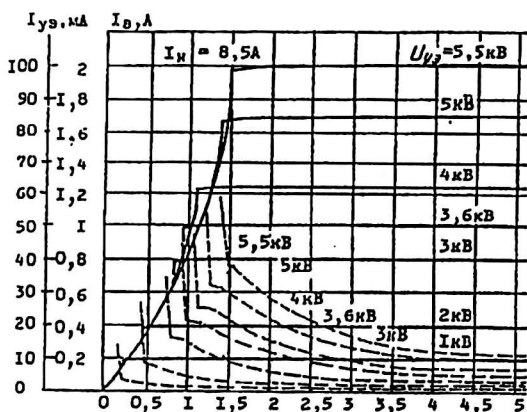


Рис. 4. ЭЛВ 200/1:

- вольт-амперные характеристики;
- - - - потери тока на сетке

Испытания прибора на электрическую прочность показали возможность его использования на воздухе до 70 кВ, а при наличии внешней масляной изоляции — до 200 кВ. Запирание прибора характеризуется током 50 мкА при положительном потенциале на аноде 200 кВ и составляет 800 В.

**ЭЛВ 4/40.** Назначение ЭЛВ 4/40 — формирование длинных импульсов (1–100 мс), а также защитная функция и стабилизация тока в нагрузке питания мощной радиоэлектронной аппаратуры, работающей в частотно-импульсном режиме со средней коммутируемой мощностью до 200 кВт и напряжением 40–60 кВ.

В основу ЭЛВ 4/40 положена многолучевая система с восемью катодными узлами, расположенными коаксиально и формирующими ленточные потоки (рис. 5, а).

В ЭЛВ использовано торможение электронного потока на плоской поверхности анода. Глубина торможения потока в этом случае определяется отсутствием тангенциальной составляющей скорости электронов. Для управления потоком электронов была использована электронная линза, образованная ускоряющей сеткой (С) и защитным электродом (З.Э.), имеющим катодный потенциал. Основная роль защитного электрода — влияние на глубину и

форму минимума потенциала, образующегося вблизи анода при торможении электронного потока. Минимум потенциала является потенциальным барьером, задерживающим вторичные электроны, отраженные от анода. В результате снижается ток на ускоряющий электрод. Результаты траекторного анализа одного из лучей ЭОС ЭЛВ 4/40 при отношении  $U_a/U_c = 20\%$  представлено на рис. 5, в. Первеанс системы с восемью лучами —  $85 \text{ мкА/В}^{3/2}$ . Прибор имеет металлокерамическую конструкцию, его габаритные размеры  $273 \times 314 \times 435 \text{ см}$ .

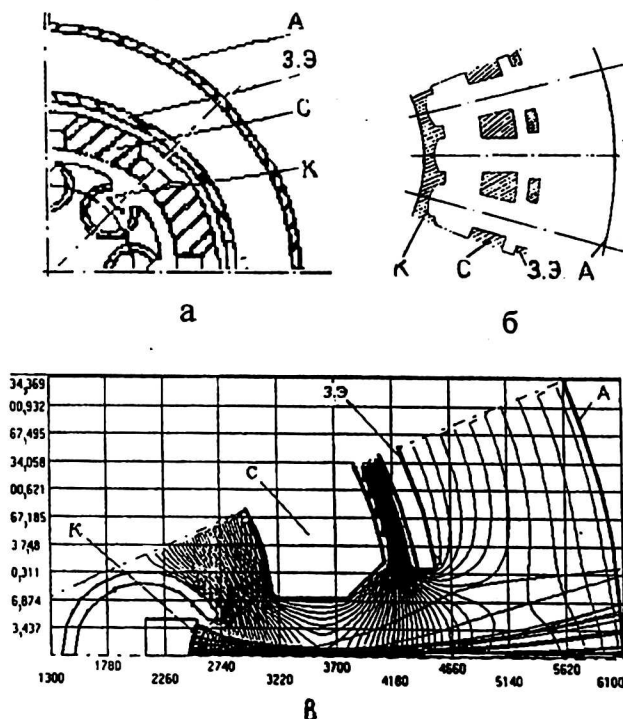


Рис. 5. ЭОС ЭЛВ 4/40:

а — геометрия электродов ЭЛВ 4/40; б — геометрия электродов модернизированного ЭЛВ 4/40 в масштабе 2:1 по отношению к рис. 5, а; в — результаты траекторного анализа ЭЛВ 4/40; К — катод; С — сетка; 3Э — защитный электрод; А — анод

Вольт-амперные характеристики представлены на рис. 6. Из них следует, что анодный ток 8 А может быть получен при напряжении на ускоряющей сетке 2,8 кВ, потери тока на сетке составляют 3,8 % при глубине торможения 21 %. Наклон горизонтального участка не превышает 50 мА/кВ. Электрическая прочность ЭЛВ 4/40 — до 60 кВ, запирающий потенциал на сетке прибора 500 В при напряжении на аноде 60 кВ, при этом утечка тока по изоляции не превышает 0,6 мА.

Для улучшения массогабаритных характеристик прибора была приведена его модернизация. Расположение электродов модернизированного ЭЛВ — ЭОС представлено на рис. 5, б. В результате разработки этой ЭОС и конструкции на ее основе получена глубина торможения (~ 21–23 %) с малыми потерями тока на сетке (< 4 %) при габаритных размерах в 4 раза и массы в 3 раза меньших по сравнению с существующим вариантом.

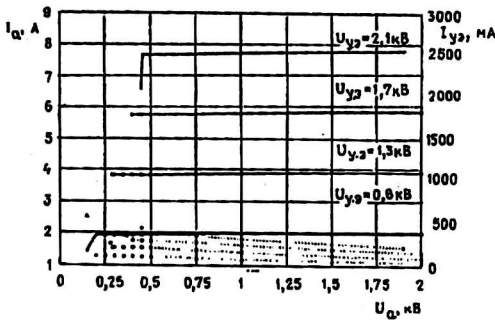


Рис. 6. ЭЛВ 4/40:  
 — — вольт-амперные характеристики;  
 - - - - потери тока на сетке

**Многолучевой высоковольтный ЭЛВ 50/100.** ЭЛВ с током коммутации 50 А в постоянном режиме при коммутируемом напряжении 100–150 кВ предназначен для использования в качестве модуляторов защитных элементов источников питания инжекторов ионов и гиратронов для термоядерных установок. В импульсном режиме с током до 500 А при средней коммутируемой мощности в частотно-импульсном режиме до 20 мВт он может быть использован в установках газочистки или технологических плазмохимических устройствах, использующий высоковольтный коронный разряд.

Существующий ЭЛВ 50/100 создан на основе ЭОС с центробежно-электростатическим формированием (ЦЭФ), предложенной З. С. Черновым [3], являющейся трансформацией известного решения для кругового потока электронов, в котором электроны, пройдя ускоряющее поле сеточного электрода, находящегося вне потока, приходят на анод с нулевой скоростью. Использование в ЦЭФ электронных потоков в виде расходящихся логарифмических спиралей при смещении отбирающего ток электрода к катоду позволило создать ЭОС с большим расстоянием от сетки до анода. Поскольку сетка вынесена из потока электронов, в области сетки отсутствует линза. Следовательно, не возникают тангенциальные составляющие скорости электронов. Используемый принцип оптимален для реализации глубокого торможения на плоском аноде. На рис. 7, а показан принцип формирования электронного пучка на основе логарифмических спиралей, на рис. 7, б приведено расположение электродов системы с ЦЭФ.

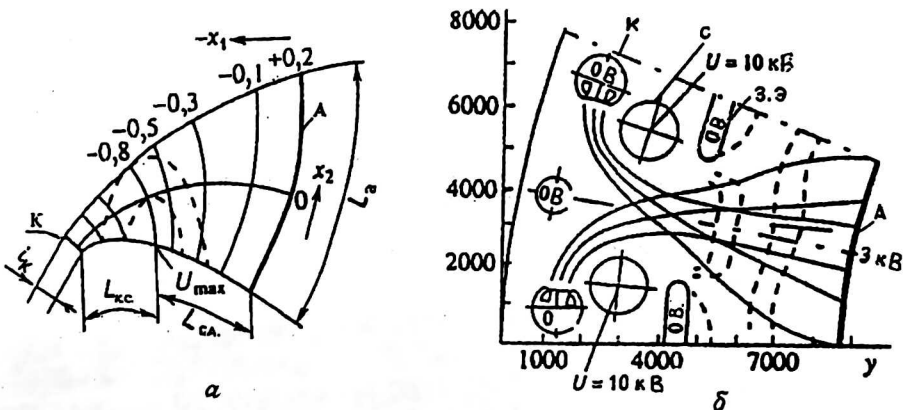


Рис. 7. ЭОС с ЦЭФ:

а — принцип формирования пучка с ЦЭФ; б — электроды ЭОС с ЦЭФ;  
 ФЭ — фокусирующий электрод; остальные обозначения — такие же, что на рис. 5

Для более полного использования объема прибора пучки попарно совмещены. В системе используется защитный электрод с катодным потенциалом. Поворот пучков осуществляется поперечным электростатическим полем, создаваемым ускоряющей сеткой и специальным фокусирующим электродом с нулевым потенциалом.

Созданный на основе этой ЭОС ЭЛВ 50/100 позволяет при 10 кВ на сетке отобрать ток 50 А в постоянном режиме. Потери тока на сетке не превышают 5 %, предельная глубина торможения  $U_a U_c \sim 30$  %. Недостатком прибора являются неравномерность отбора тока по поверхности катода и недостаточно полное использование объема.

Для создания ЭЛВ с подобными параметрами и улучшенными массогабаритными характеристиками предложено использовать ЭОС с плоскосимметричными ленточными пучками, аналогичными ЭОС ЭЛВ 4/40. На рис. 8, а, б изображена схема расположения электродов в ЭЛВ с ЦЭФ и новый вариант ЭОС с плоскосимметричными пучками.

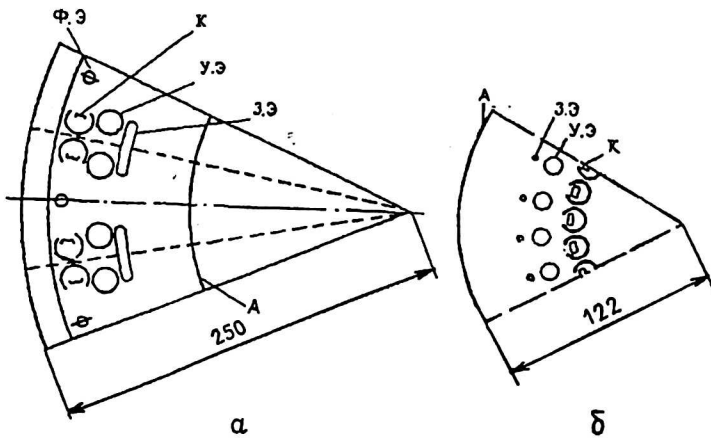


Рис. 8. ЭОС ЭЛВ 50/100:

а — геометрия электродов ЭЛВ с ЦЭФ; б — геометрия электродов ЭОС ЭЛВ с плоскосимметричными пучками, выполненная в одном масштабе с ЭОС с ЦЭФ

Конструкция ЭЛВ с новой ЭОС позволяет в три раза уменьшить объем и массу прибора при неизменных электрических параметрах.

На рис. 9 представлен результат траекторного анализа одного из 24 лучей.

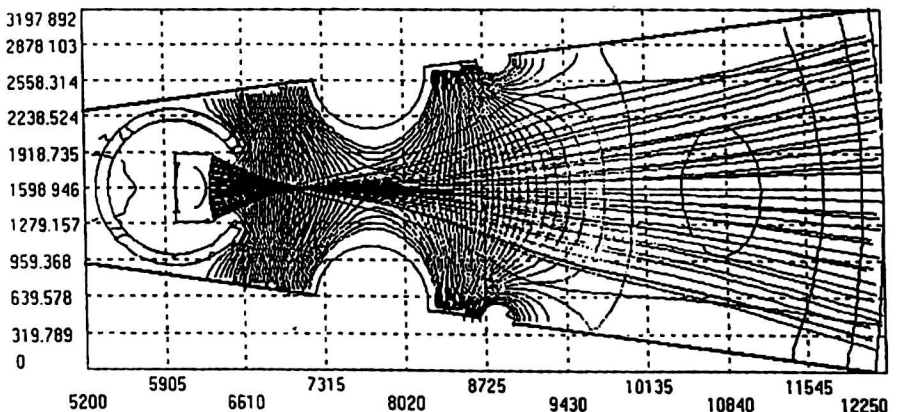
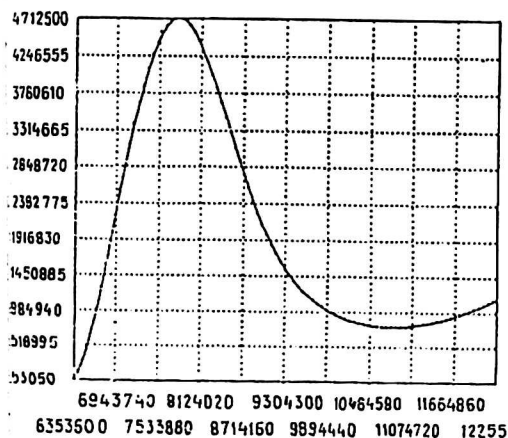


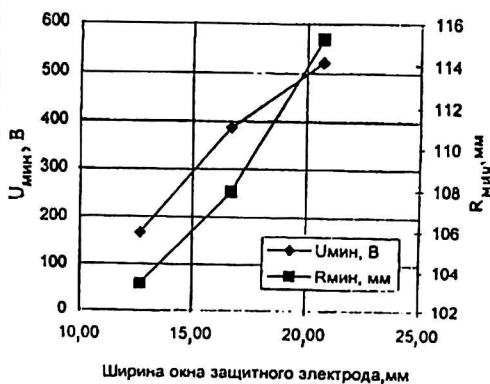
Рис. 9. Результаты траекторного анализа ЭОС с плоскосимметричными пучками

В основу расчета, как и в ЭОС ЭЛВ 4/40, положено сопряжение анодной области как зеркального отражения увеличенной в масштабе прикатодной области. Вблизи ускоряющей сетки в анодном пространстве установлен защитный электрод, имеющий потенциал катода. Этот электрод вместе с ускоряющей сеткой создает электронную линзу, позволяющую осуществить сопряжение двух областей с минимальной тангенциальной составляющей электронов в потоке и обеспечить их ортогональное падение на поверхность анода, что приводит к минимальному отражению от анода электронов. Создаваемый в потоке электронов этой же линзой минимум потенциала, его конфигурация, положение и глубина определяют задержку вторичных электронов при глубоком торможении.

На рис. 10, а приводится распределение потенциала в плоскости симметрии пучка, на рис. 10, б — влияние расстояния между прутками защитного электрода на глубину минимума потенциала и его расстояния от катода. Сопоставление этих данных с экспериментом показывает, что оптимальным является приближение минимума к аноду.



а



б

рис. 10. Распределение потенциала в плоскости симметрии пучка (а); влияние электронной линзы на минимум потенциала (б)

В настоящее время ЭЛВ с данной ЭОС находится в стадии разработки. Траекторный анализ показывает, что в данной ЭОС возможно реализовать потенциал на аноде до 10 % от потенциала ускоряющей сетки (глубина торможения) с минимальными потерями.

В таблице приведены параметры разработанных ЭЛВ и области их применения.

Параметры	ЭЛВ 200/1	ЭЛВ 4/40	ЭЛВ 50/100	ЭЛВ 50/100 М
$U_{КОМ}, кВ$	200	60	100	100
$I_{КОМ}, А$	1	8	50	50
$U_a$ при $I_a макс$	1,5	0,5	1,5	1,2
$U_c/U_{КОМ}$	5/200	2/60	10/100	5/150
$U_a/U_c$	0,3	0,3	0,3	0,2
$\eta, \%$	97,8	98,4	96,2	98,7

## В ы в о д ы

С использованием принципа торможения электронного потока на аноде были разработаны три типа электронных приборов – электронно-лучевых вентилей (ЭЛВ). ЭЛВ предназначены для применения в различных высоковольтных устройствах, работающих в режимах постоянного тока, большой длительности импульса и частотно-импульсных с большим значением средней коммутируемой мощности. Понижение потенциала до 30 % от сеточного позволило обеспечить малое значение внутреннего сопротивления и высокое электронное КПД.

Проведенные исследования формирования электронного потока в области торможения позволили понизить потенциал до 10–20 % от потенциала сетки и, таким образом, увеличить электронный КПД.

Проведена разработка конструкции ЭЛВ, что существенно уменьшило массогабаритные показатели приборов.

## Л и т е р а т у р а

1. Переводчиков В. И., Нагучев О. Ю. Рекуперация энергии при торможении электронного потока на аноде, как средство повышения мощности и эффективности электронных коммутирующих приборов//Радиотехника и электроника. 1981. № 12.
2. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Акимов П. Н. Электронно-оптические системы высоковольтных коммутирующих электронных приборов//Там же. 1997. Т. 42. № 3.
3. Чернов З. С., Барнашевский Г. А. Электронно-оптическая система с ЦЭФ/Задачи физической электроники. – М.: Наука, 1982.

## New type of high-power switching electron tubes – electron-beam valves

V. I. Perevodchikov, V. N. Shapenko, V. F. Martynov,  
P. M. Stalkov, A. L. Shapiro

Russian Federation State Research Center "All-Russian Electrotechnical Institute", Moscow, Russia

*The new type of switching electron tubes – an electron-beam valve (EBV) is considered. The principle of an electronic beam forming in EBV with deceleration at the anode has allowed to develop devices with new featured characteristics. EBV are effectively used for forming pulsus of long duration (millisecond and second) or for high-speed protective switching-off of an equipment (unit of microseconds). The results of development of electron-optical systems and constructions of three types EBV on their basis are presented. The characteristics of devices are gives and the perspectives of further development are determined.*