

УДК 621.385.832

## Особенности высоковольтных коммутирующих устройств на основе электронно-лучевых вентилях

В. И. Переводчиков, Н. В. Матвеев, В. М. Стученков,  
В. Н. Шапенко

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", Москва, Россия

*Рассмотрены коммутирующие высоковольтные устройства на основе нового класса приборов — электронно-лучевых вентилях (ЭЛВ). Приводится расчет оптимального режима ЭЛВ на основе его математической модели. Даны примеры реализации коммутаторов с ЭЛВ — модулятор импульсов радиолокационной станции и система знакопеременного питания пылегазоулавливающих электрофильтров.*

Развитие телекоммуникаций, радиоэлектроники и высоких технологий привело к необходимости создания высоковольтных систем питания, работающих в режиме большой длительности импульсов и малой скважности, а также режимов постоянного тока с возможностью быстрого отключения под нагрузкой. Анализ показывает, что начиная с уровня напряжения ~ 30 кВ и выше оптимальными ключевыми элементами по качеству, долговечности и экономическим показателям являются вакуумные электронные лампы. Однако использование существующих высоковольтных импульсных модуляторных ламп неоптимально [1].

В ГУП "ВЭИ" были созданы высоковольтные коммутирующие лампы специального типа — ЭЛВ. Основные особенности их — высокий КПД и возможность коммутировать большую мощность нагрузки в постоянном или частотно-импульсном режиме.

Использование в ЭЛВ принципа рекуперации энергии при торможении потока электронов на аноде и тщательное формирование электронного потока дают возможность реализовать в ключевом режиме следующие параметры:

|   |       |
|---|-------|
| коммутируемое напряжение, кВ .....  | 4—200 |
| номинальный ток, А .....  | 2—50  |
| частотно-импульсный режим с коммутацией в нагрузке<br>средней мощности, МВт ..... | 0,2—5 |
| электронный КПД, рассчитанный по мощности, комму-<br>тируемой в нагрузке, % ..... | 98—99 |
| внутреннее сопротивление в ключевом режиме, Ом .....                              | 1,2   |

ЭЛВ имеют также пологую вольт-амперную характеристику со слабой зависимостью коммутируемого тока от анодного напряжения (не превышающей 30 мА/кВ). Это позволяет ограничивать величину предпробойного тока или стабилизировать ток нагрузки [2].

В настоящее время разработаны ЭЛВ трех номиналов (табл. 1), предназначенные для использования в системах питания пылеулавливающих электрофильтров и других высоковольтных слаботочных технологических установок (ЭЛВ 2/200), мощных радиоэлектронных устройств (ЭЛВ 4/40) и мощных инжекторных заряженных частиц, тиратронов и т. д. (ЭЛВ 50/100).

Таблица 1

Техническая характеристика электронно-лучевых вентиляей

| Параметры  | ЭЛВ 2/200 | ЭЛВ 4/40 | ЭЛВ 50/100 |
|--|-----------|----------|------------|
| Максимальное коммутируемое напряжение, кВ                            | 200       | 60       | 60         |
| Коммутируемый ток, А   | 1         | 8        | 50         |
| Импульсный ток, А  | 5         | 8—40     | 100—300    |
| Максимальное анодное напряжение при максимальном постоянном токе, кВ | 1,5       | 0,5      | 1,5        |
| Максимальная мощность, рассеиваемая анодом, кВт                      | 10        | 20       | 800        |
| Мощность накала, кВт   | 0,1       | 0,4      | 4          |
| Габаритные размеры, мм:  |           |          |            |
| диаметр  | 190       | 250      | 509        |
| высота   | 370       | 400      | 1190       |
| Масса, кг  | 25        | 30       | 180        |

Рассмотрим особенности расчета оптимального режима ЭЛВ на основе его математической модели [3].

В проводящем состоянии электронные вентиля работают с торможением электронного потока на аноде. Тщательное формирование пучка обеспечивает прямые потери тока на ускоряющий электрод не более единиц процентов вплоть до перехода в режим возврата. Так как микропервенеанс электронно-оптической системы ЭЛВ остается практически постоянным в широком диапазоне изменения ускоряющего напряжения, можно рассматривать токопрохождение в ЭЛВ как одну из определяющих функций, описывающих вид вольт-амперных характеристик прибора. На рис. 1 приведены зависимости коэффициента токопрохождения  $q$  от относительного потенциала анода для нескольких типов электронно-лучевых вентиляей.

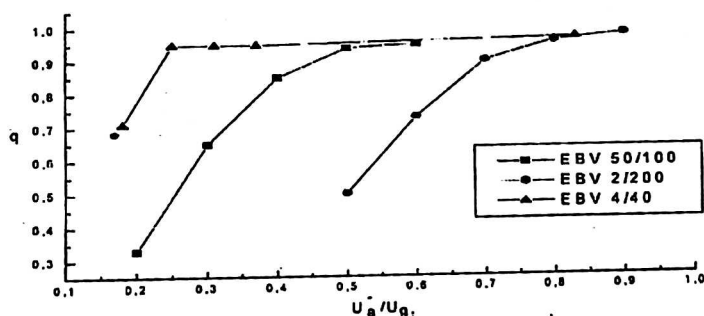


Рис. 1. Характеристики токопрохождения электронно-лучевых вентиляей в режиме торможения

В работе [3] показано, что вольт-амперные характеристики ЭЛВ в области переходного режима могут быть представлены следующей системой уравнений:

$$I_a = qP(U_g + DU_a)^{3/2};$$

$$I_g = (1 - q)P(U_g + DU_a)^{3/2};$$

$$q = \operatorname{erf}((\varphi_a - \Delta\varphi) / \varphi_0);$$

$$\varphi_a = U_a / U_g,$$

где  $I_a, I_g, U_a, U_g$  — ток и напряжение на аноде и управляющем электроде, соответственно;  $q$  — коэффициент токопрохождения;  $P, \Delta\varphi, \varphi_0$  — параметры приборов, рассчитываемые по результатам приемосдаточных испытаний в процессе их изготовления.

В табл. 2 приведены параметры для ряда ЭЛВ.

Таблица 2

Типовые значения параметров для ряда ЭЛВ

| Параметры          | ЭЛВ 2/200 | ЭЛВ 4/40 | ЭЛВ 50/100 |
|--------------------|-----------|----------|------------|
| $P, \mu A/V^{3/2}$ | 12        | 88       | 300        |
| $\Delta\varphi$    | 0,4       | 0,14     | 0,03       |
| $\varphi_0$        | 0,25      | 0,07     | 0,26       |

Приведенная выше система уравнений позволяет относительно точно описать характеристику токопрохождения вентиля в широком диапазоне изменения напряжения на его электродах. Таким образом, для любой электрической схемы с использованием ЭЛВ может быть составлена система уравнений, связывающих токи и напряжения на элементах, и определены статические и динамические характеристики устройства.

Современные системы проектирования электронной аппаратуры базируются на программах схемотехнического моделирования типа SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). В ставших де-факто стандартом пакетах DesignLab, OrCad электрические схемы вводятся с помощью графических редакторов, а расчет обеспечивается программой моделирования аналого-цифровых устройств, например PSpice A/D. Принятая система математических моделей электронных компонентов позволяет на основе типовых базовых моделей представить все многообразие возможных для применения приборов, имеющих на рынке. Практически все ведущие производители электронных компонентов в настоящее время снабжают свою продукцию Spice-моделями, обеспечивая удобство пользования при расчетах.

На рис. 2 приведена схема такой макромоделли для ЭЛВ, построенная на основе описанной выше системы уравнений. В состав модели входят управляемые источники тока анода и сетки  $I_a, I_g$ , выходной ток которых определяется величиной рассчитанного катодного тока и коэффициентом токопрохождения. Модель построена на основе аналоговых компонентов типа ABM, TABLE, LIMIT и т. д., входящих в библиотеку стандартных символов программы моделирования.

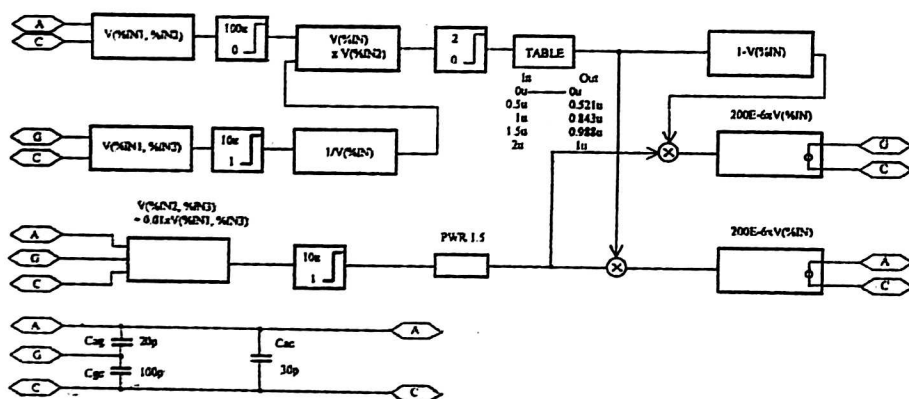


Рис. 2. Макромодель электронно-лучевого вентиля

С внешней схемой модель взаимодействует с помощью трех интерфейсных портов А, G, С, соответствующих аноду, управляющему электроду и катоду вентиля. Анодный ток определяется текущим значением напряжения на управляющем электроде и глубиной торможения, т. е. отношением анодного и ускоряющего напряжений, а величина анодного напряжения, в свою очередь, зависит от тока анода и сопротивления нагрузки в анодной цепи. Таким образом, напряжение на аноде и управляющем электроде вентиля находится как результат самосогласованного решения для каждой конкретной электрической схемы. Интеграл ошибок, определяющий токопрохождение, может быть рассчитан с любой заданной точностью с помощью числового ряда

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( x - \frac{x^3}{1! \cdot 3} + \frac{x^5}{2! \cdot 5} - \frac{x^7}{3! \cdot 7} + \dots \right).$$

Примером реализации коммутирующего устройства с ЭЛВ может служить модулятор импульсов радиолокационной станции.

На рис. 3, а приведена структурная схема высоковольтного электронно-лучевого коммутатора, выполненного на ЭЛВ 4/40. Коммутатор предназначен для формирования на нагрузке импульсов напряжения отрицательной полярности с амплитудой до 40 кВ и токе до 8 А при изменении в широких пределах частоты и длительности формируемых импульсов. Особенностью устройства является необходимость удовлетворения достаточно жестким требованиям по габаритам и массе. С этой целью питания цепей собственных нужд коммутатора осуществляется на повышенной до 10 кГц частоте от преобразователя ПСН со средней мощностью порядка 3 кВт. Малогабаритный изолирующий трансформатор (ИТ) обеспечивает гальваническое разделение преобразователя и выхода трансформаторно-выпрямительного блока (ТВБ) силового преобразователя. Питание на потенциале ВН различных и так же гальванически не связанных друг с другом цепей обеспечивается от линии постоянного тока, организованной на стороне высокого напряжения. Такое решение позволяет с помощью малогабаритных высокочастотных преобразователей ДС-ДС получить заданное качество питания по большому числу независимых каналов с импульсной нагрузкой.

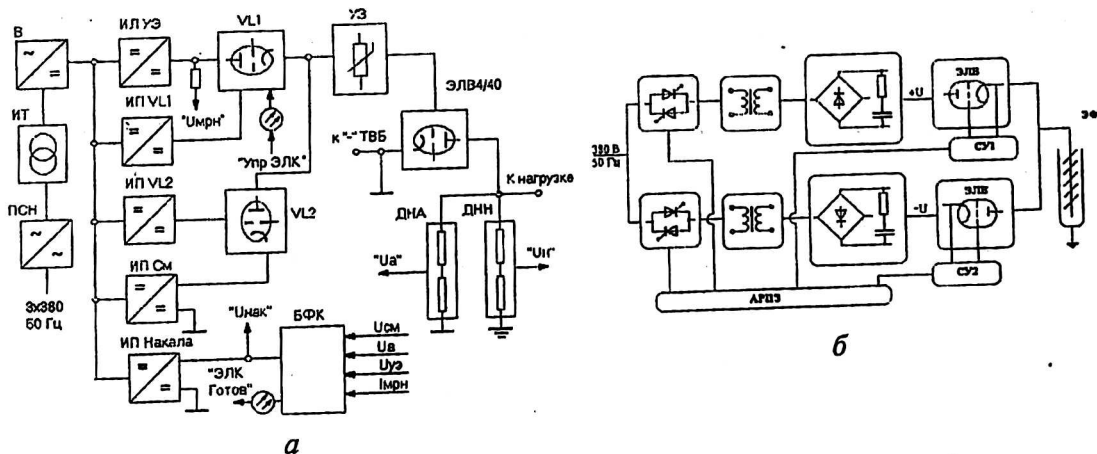


Рис. 3. Блок схема:

а — высоковольтного электронно-лучевого коммутатора ВЭЛК 8/40;  
б — источника питания АПЭЛ-80

Другим примером создания коммутатора на основе ЭЛВ может служить система знакопеременного питания пылегазоулавливающих электрофильтров [4]. Использование ЭЛВ 2/200 (уровень напряжения +80 кВ, ток до 2А) позволяет изменять полярность напряжения в электрофильтре. Это приводит к повышению КПД электрофильтра при улавливании высокоомной пыли (удельное сопротивление  $R_v > 10^9$  Ом·м), а также к повышению эксплуатационной надежности и экономии средств на обслуживание за счет отказа от систем механического отряхивания осадительных электродов.

Функциональная схема источника питания АПЭЛ-80, обеспечивающего изменение полярности напряжения, приведена на рис. 3, б.

АПЭЛ-80 имеет два параллельных независимых высоковольтных канала положительной и отрицательной полярности, нагруженных на электрофильтр, и, соответственно, два ЭЛВ 2/200.

Автоматическое устройство регулирования (АРПЗ) осуществляет операции управления и контроля.

На приведенных осциллограммах (рис. 4, а и б) очевидно, что быстродействие ЭЛВ определяет возможность выхода на режим за 10 мс, т. е. в 4 раза быстрее. Таким образом, использование ЭЛВ в источнике знакопеременного питания дает следующие преимущества:

- повышение эффективности пылеочистки;
- увеличение срока эксплуатации электродов электрофильтра;
- возможность предотвращения перехода разряда в искровой.

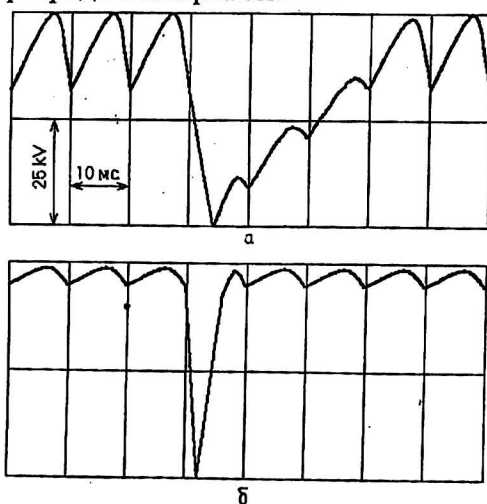


Рис. 4. Осциллограммы восстановления напряжения на электродах электрофильтра после пробоя при использовании:

- а — штатного источника питания;
- б — знакопеременного источника питания на основе ЭЛВ

Эти примеры использования коммутирующих устройств на основе ЭЛВ показывают их преимущества по сравнению с традиционными источниками питания подобного применения.

### Л и т е р а т у р а

1. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Стальков П. М. Электронно-лучевые вентили (ЭЛВ) — высоковольтные коммутирующие лампы для мощных электротехнических схем// Сб. тр. ВЭИ. — М., 2001.
2. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Акимов П. И. Электронно-оптические системы высоковольтных коммутирующих электронных приборов// Радиотехника и электроника, 1997. Т. 3. № 3. С. 361.
3. Матвеев Н. В. Характеристики сильноточных электронно-лучевых вентилях в режиме торможения электронного потока// Там же. С. 640—648.
4. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Стученков В. М. и др. Электронно-лучевая аппаратура для знакопеременного питания электрофильтров// Электротехника, 1992. № 1. С. 30.

## Features of high-voltage switching devices on the basis of electron beam valves

V. I. Perevodchikov, N. V. Matveev, V. M. Stuchenkov,  
V. N. Shapenko

The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

*Switching high-voltage devices on the basis of a new class of devices electron beam valves (EBV) are considered. Calculation of optimum operation mode EBV on the basis of its mathematical model is given. Examples of realization of commutators with EBV: the modulator of pulse of a radar station and a system of alternating polarity power supply (APPS) of electrostatic precipitators (ESP) are given.*