

УДК 537.533.3

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

*П. И. Акимов, А. Б. Богословская*

Московский государственный открытый университет, Москва, Россия

*Представлена методика расчета и рассмотрены основные принципы построения электронно-оптических систем электронно-лучевых вентиляей. Продемонстрированы пути оптимизации параметров электронно-оптических систем с торможением пучка на поверхность открытого типа и антидинаatronным электродом в области торможения.*

Новый класс приборов — электронно-лучевых вентиляей (ЭЛВ) — был предложен в 1967 г. Г. И. Будкером и В. И. Переводчиковым [1]. ЭЛВ — сильноточные электровакуумные приборы, применяемые для коммутации и регулирования в мощных высоковольтных электрических схемах, таких как системы электропитания электронно-лучевых технологических установок, пылеулавливающих электрофильтров, инжекторов сильноточных ускорителей и т. п. При этом ЭЛВ используются для формирования импульсов большой длительности (миллисекунды и секунды) или защитной коммутации цепей постоянного тока. Для достижения высокого КПД работы прибора в схеме и возможности рассеивания значительной мощности электродами прибора, что необходимо для коммутации больших мощностей, в основу принципа построения прибора положены отбор тока повышенным анодным напряжением, тщательное формирование электронного потока и торможение пучка (желательно, глубокое) на коллекторе прибора. Само название прибора подчеркивает его назначение и, в отличие от классических сеточных ламп, высокое качество формирования электронного потока. В связи с тем, что в ЭЛВ отбирающее пучок напряжение прикладывается к зазору между катодом и анодом пушки (ускоряющим электродом [1]), а высокое коммутируемое напряжение падает на промежутке между ускоряющим электродом и коллектором, то последний промежуток должен быть больше (желательно значительно больше), чем первый. Таким образом, основной задачей при разработке ЭЛВ явилось создание электронно-оптических систем (ЭОС) прибора с существенно различной длиной промежутков ускорения и торможения электронного пучка, иначе говоря, с разномасштабными областями ускорения и торможения пучка, названных в дальнейшем неравноплечными ЭОС.

Уже первые результаты практической реализации принципов, заложенных в основу нового класса приборов [2—4], показали их несомненные преимущества по сравнению с параметрами коммутирующих и модулирующих тетродов в традиционном сеточном исполнении. Однако используемые в этих первых конструкциях ЭЛВ типы ЭОС (с коллектором в виде цилиндра Фарадея или с центробежно электростатическим формированием электронного пучка) не позволяли реализовать все возможности, заложенные в принцип построения приборов нового класса.

Гораздо более перспективным с точки зрения реализации всех принципиальных достоинств приборов типа ЭЛВ оказалось использование для создания таких приборов систем с глубокой рекуперацией энергии электронных пучков с прямолинейной осью (плоскостью) симметрии, построенных по подобию "обращенной пушки Пирса" [5—8]. В работах [5, 6] были подробно рассмотрены возможные варианты создания ЭОС приборов с глубоким торможением пучка в системах, построенных по подобию "обращенной пушки Пирса". Методика приближенного расчета подобных ЭОС изложена в работе [6]. В реальных конструкциях ЭЛВ используются многолучевые ЭОС с ленточными пучками. Параметры области торможения такой неравноплечной ЭОС (рис. 1) можно

однозначно выразить через параметры пушки и эквипотенциального промежутка, согласующего пушку и область торможения, простым соотношением [6]:

$$F(\rho_{\text{акал}}) = \frac{(F(\rho_a) + 2 / 9 |\gamma_a| Z)^2}{F(\rho_a) + |\gamma_a| F(\rho_a) Z + 1 / 9 \gamma_a^2 Z^2}, \quad (1)$$

где  $Z = Z_{\text{экви}} / y_a$ , причем  $Z = 0$ , для  $\rho_a < 1,9$ ;

$Z = 9F(\rho_a) / |\gamma_a|$ , для  $1,9 < \rho_a < 2,84$ ;

$Z = 9F(\rho_a) / |\gamma_a| (1 - (1 - 4/9 / F(\rho_a))^{1/2})$ , для  $\rho_a > 2,84$ ;

$F(\rho_a) = 4,67 \gamma_a^2 / P_1 y_a$ ,  $\rho_a = R_k / R_a$ ,  $\rho_{\text{акол}} = R_{\text{кол}} / R_{\text{акол}}$ ,

$P_1$  — удельный микропереванс пучка на единичную ширину катода, выраженный в мкА/(В<sup>3/2</sup>.см);

$y_a$  — полутолщина пучка в плоскости входа в анод пушки;

$\gamma_a$  — угол расходимости граничных траекторий после преломления в анодном отверстии пушки;

$Z_{\text{экви}}$  — протяженность эквипотенциального промежутка;

$R_k, R_a (R_{\text{кол}}, R_{\text{акол}})$  — радиусы кривизны катодной, анодной эквипотенциальных поверхностей пушки, соответственно, нулевой и анодной эквипотенциальных поверхностей области торможения.

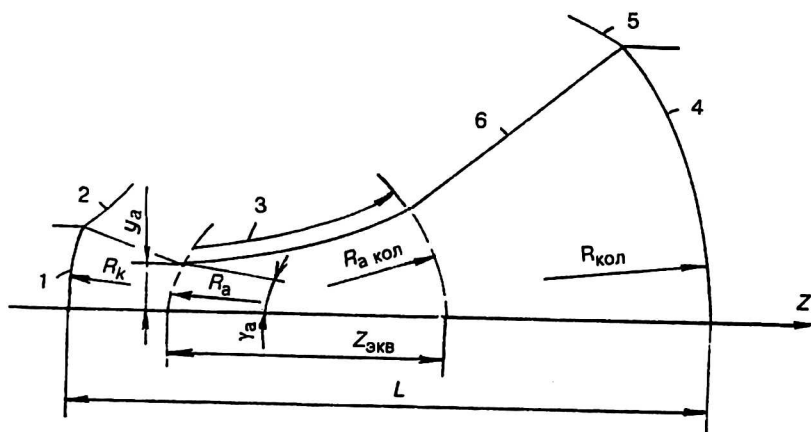


Рис. 1. Схема построения идеализированной неравноплечной ЭОС с торможением ленточного электронного пучка:

- 1 — катод; 2 и 5 — прикатодный и приколлекторный фокусирующие электроды; 3 — анод;
- 4 — коллектор; 6 — граничная траектория пучка;  $L$  — длина ЭОС;  $Z_{\text{экви}}$  — длина эквипотенциального промежутка;  $y_a$  — полутолщина пучка в плоскости анода;  $\gamma_a$  — угол сходимости граничной траектории после преломления в анодном отверстии пушки,
- $R_k, R_a (R_{\text{кол}}, R_{\text{акол}})$  — радиусы кривизны катода, анода пушки, (соответственно, нулевой и анодной эквипотенциальных поверхностей области торможения)

Соотношение, характеризующее степень неравноплечности такой системы, количественно можно выразить с помощью коэффициента неравноплечности  $\varepsilon$ , определяющего превышение протяженности высоковольтного зазора над длиной промежутка катод — анод пушки,  $\varepsilon = (R_{\text{кол}} - R_{\text{акол}}) / (R_k - R_a)$ , следующим образом [6]:

$$\varepsilon = \frac{(\rho_{\text{акол}} - 1) \eta(\rho_{\text{акол}})}{(\rho_a - 1) \eta(\rho_a)} \cdot \frac{1 + |\gamma_a| Z + \gamma_a^2 Z^2 / (9F(\rho_a))}{1 + 2 / 9 \gamma_a Z / F(\rho_a)}, \quad (2)$$

где  $\eta(\rho_a)$  и  $\eta(\rho_{\text{акол}})$  — коэффициенты преломления пучка в анодных отверстиях пушки и области торможения [6].

С помощью приведенных соотношений можно, задавшись параметрами пучка в пушке и длиной согласующего эквипотенциального промежутка, провести рас-

чет всех характерных размеров неравноплечной плоскосимметричной ЭОС с торможением ленточного пучка на нулевую эквипотенциаль. Найденное в результате расчета идеализированное решение используется для последующего проектирования ЭОС конкретного прибора с применением экспериментальных подходов или метода численного моделирования [7, 8]. При этом основной проблемой, решаемой при создании реальных конструкций ЭЛВ на основе предложенных неравноплечных ЭОС с торможением пучка на открытую поверхность коллектора, является проблема подавления вторичных электронов. В классических лампах с этой целью вводятся специальные антидинаatronные сетки. Однако такой подход при разработке мощных электронно-лучевых приборов с глубоким торможением пучка на коллекторе неприемлем. Как показали исследования [8—11], наиболее перспективным методом решения проблемы запираия вторичных электронов на коллекторе в мощных приборах является применение в области торможения пучка специальных низкопотенциальных электродов, в частности, супрессора (рис. 2, а) или защитного электрода (рис. 2, б). Введение подобных электродов приводит к формированию в приколлекторной области минимума потенциала "открытого типа", обеспечивающего эффективное подавление вторичной эмиссии с коллектора. Разработка реальных конструкций ЭОС приборов с глубоким торможением пучка на поверхность коллектора, ортогональную траекториям электронов, с антидинаatronным минимумом потенциала осуществляется на основе применения специализированных программ синтеза [7] и пакета программ численного анализа ЭРА [12]. Исходными вариантами для численного проектирования являются полученные в результате расчета по представленной выше методике приближенные решения. Подобный подход к проектированию ЭОС позволяет получать любые варианты систем, отличающихся такими параметрами, как первеанс пучка, коэффициент неравноплечности, степень торможения пучка на коллекторе, относительная глубина антидинаatronного минимума потенциала. При этом место расположения и форма антидинаatronного электрода, как показали проведенные расчеты, существенно определяют как эффективность функционирования самой системы торможения, так и выходные характеристики прибора.

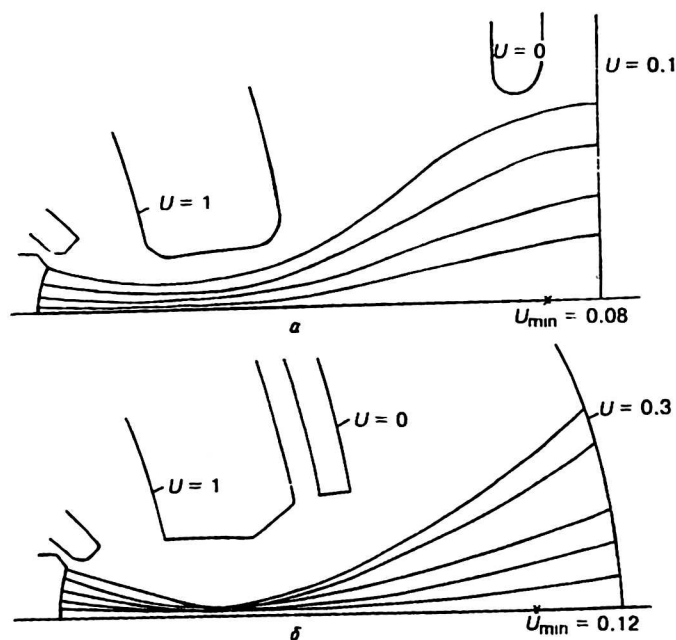


Рис. 2. Результаты расчета и оптимизации неравноплечных ЭОС ЭЛВ с ленточными пучками:  
 а — неравноплечная ЭОС с приколлекторным антидинаatronным электродом;  
 б — вариант неравноплечной ЭОС с защитным электродом

Для улучшения параметров современных конструкций электронно-лучевых вентилей необходима разработка вариантов неравноплечных ЭОС, обладающих набором взаимоисключающих параметров, а именно: высокими величинами перванса пучка и коэффициента неравноплечности, низким потенциалом коллектора, глубоким минимумом потенциала, по возможности наиболее равномерным для центральных и граничных траекторий пучка. Таким образом, задача построения ЭОС ЭЛВ формально относится к категории многофакторных оптимизационных задач.

Результаты расчета и численной оптимизации двух различных типов плоско-симметричных неравноплечных ЭОС с торможением пучка на коллекторе и низковольтными электродами, формирующими в пучке минимум потенциала открытого типа для задержки вторичных электронов, представлены на рис. 2.

Несомненным преимуществом системы с приколлекторным антидинаatronным электродом, представленной на рис. 2, а, как показали расчеты и экспериментальные исследования, является возможность реализации режима глубокого торможения пучка на коллекторе (до 8—10 % от величины ускоряющего пучок потенциала). Недостатки данной системы связаны с различной глубиной минимума потенциала для центральных ("приосевых") и периферийных, граничных электронов пучка. В результате в приосевой области рассматриваемой ЭОС через область минимума потенциала будет проходить значительно большая часть энергетического спектра быстрых вторичных электронов, чем в приграничной области пучка. Это приводит к довольно большим токовым потерям в системе (порядка 5—8 % от величины катодного тока). Попытка в таком варианте неравноплечной ЭОС с торможением "углубить" приколлекторный минимум потенциала приводит к нарушению полученного решения за счет появления нулевого потенциала внутри пучка и перехода системы в режим виртуального катода.

Существенно большего снижения завеса анода ЭЛВ вторичными электронами удается добиться в неравноплечной ЭОС с защитным электродом, представленной на рис. 2, б, устанавливая этот электрод непосредственно вблизи анода [13]. Несмотря на то, что введение защитного электрода приводит к снижению потенциала в области торможения, возникновения режима виртуального катода можно избежать путем определенного увеличения потенциала на коллекторе, т. е. за счет снижения глубины торможения пучка по сравнению с рассмотренной выше ЭОС. В то же время, отражая от анода практически весь спектр вторичных электронов, защитный электрод позволяет конструировать приборы с малым уровнем токовых потерь (до 1 % от величины катодного тока и менее), а тем самым и с малой мощностью системы управления. Кроме того, значительно упрощается задача охлаждения высокопотенциального анода ЭЛВ. И, наконец, отпадает необходимость в дополнительном источнике питания антидинаatronного электрода, поскольку защитный электрод целесообразно потенциально объединить с катодом ЭЛВ. Несомненный недостаток ЭОС с защитным электродом — необходимость повышения потенциала коллектора до 25—30 % от величины анодного потенциала. В связи с тем, что это приводит не только к возрастанию потерь в приборе (в 2—3 раза), но и к соответствующему увеличению его внутреннего сопротивления (важнейшего параметра для эффективного применения прибора в реальных схемах), была поставлена задача проектирования варианта неравноплечной ЭОС, совмещающего преимущества двух различных вариантов, представленных на рис. 2. В результате проведенного численного проектирования удалось создать в определенном смысле гибридную неравноплечную ЭОС с антидинаatronным электродом, вариант которой представлен на рис. 3. В представленной системе удается совместить достоинства обоих, ранее разработанных вариантов ЭОС: глубокое торможение пучка на коллекторе (до потенциалов порядка 10—12 % от анодного потенциала), достаточно эффективный для подавления вторичной эмиссии минимум потенциала в области прохождения не только гра-

ничных, но и центральных траекторий пучка, и непосредственную защиту большей части поверхности анода от вторичных электронов. Спроектированная ЭОС, обеспечивая резкое снижение потерь в приборе по сравнению с предыдущими вариантами, позволяет за счет повышения анодного напряжения и тока пучка в несколько раз повысить коммутируемую мощность при сохранении прежних массогабаритных характеристик прибора и одновременном снижении уровня потерь в приборе.

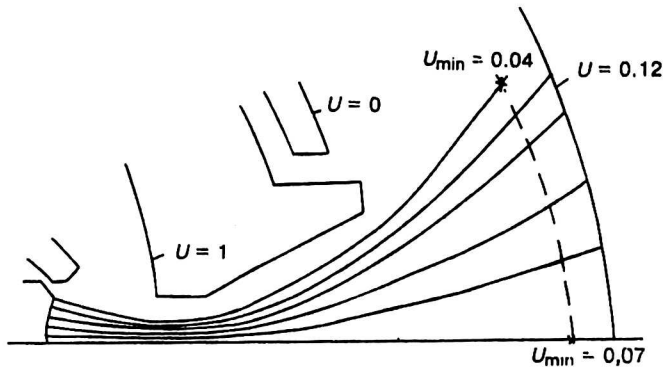


Рис. 3. Результаты проектирования "гибридного" варианта плоско-симметричной неравноплечной ЭОС с антидинаatronным электродом (пунктиром показана поверхность минимумов потенциала вдоль траекторий пучка)

Разработанные системы глубокого торможения пучка могут быть использованы и для других целей.

### Литература

1. Будкер Г. И., Переводчиков В. И.: А. с. 367482, № 8, МКИ Н 01 21/10, БИ, 1973.
2. Переводчиков В. И. // Электротехника, 1980, № 6. С. 87.
3. Переводчиков В. И., Шапенко В. Н. // Задачи физической электроники.— М.: Наука, 1982. С. 218—221.
4. Переводчиков В. И., Логинов Л. В., Шапенко В. Н. и др. // Электротехника, 1983, № 4.
5. Акимов П. И., Переводчиков В. И. // III Укр. респ. конф. по электр. оптике и ее применению, 1974. Ч. 1. С. 4.
6. Акимов П. И., Переводчиков В. И. // Задачи физической электроники.— М.: Наука, 1982. С. 144—152.
7. Акимов П. И., Верстакова Е. А., Данилов В. А., Цхай А. Б. Импульсные электромех. и полупроводн. преобразователи энергии. Куйбышев, 1978. С. 135.
8. Акимов П. И., Переводчиков В. И., Шапенко В. Н. // РЭ, 1997. Т. 42. № 3. С. 361.
9. Акимов П. И. // Прикладная физика. 1997. Вып. 2—3. С. 194—201.
10. Акимов П. И. // Там же. С. 202—209.
11. Акимов П. И. // РЭ, 1998. Т. 43. № 7 (в печати).
12. Акимов П. И., Панибрацкий В. А., Свешников В. М. // III Межд. конф. по электронно-лучевым технологиям. Варна, 1991. С. 48.
13. Акимов П. И., Нагучев О. Ю.: А. с. 457409, по заяв. № 1817665 от 0.08.72.

## THE PERFECTION OF THE ELECTRON-OPTICAL SYSTEMS PARAMETERS FOR ELECTRON BEAM SWITCH

P. I. Akimov, A. B. Bogoslovskaja  
Moscow State Open University, Moscow, Russia

The method of calculation and the main principles of construction of electron optical systems for electron beam switch are discussed in this paper. We demonstrated the ways of the optimization of the parameters of systems for electron beam deceleration on open type surface with the special electrode for secondary emission retardation.