УДК 537.533.3

Принципы построения и численного проектирования электронно-оптических систем мощных коммутирующих приборов

П. И. Акимов, В. И. Переводчиков
ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

Приведены пути создания систем формирования электронных пучков для мощных коммутирующих приборов и проблемы, возникающие при реализации указанных систем. Сформулированы принципы построения неравноплечных электронно-оптических систем (ЭОС) с глубоким торможением пучка для электронно-лучевых вентилей (ЭЛВ). Описаны основные положения разработанной методики расчета ЭОС, позволяющей проводить расчет ЭОС ЭЛВ с учетом вторичной эмиссии с анода прибора.

Принцип построения электронных приборов для коммутации высоковольтных цепей, работающих в режиме постоянного тока и длинных импульсов, был предложен в 1967 г. [1]. Сам прибор получил название ЭЛВ, чем подчеркивалось его назначение и высокое качество формирования электронного потока. ЭЛВ предназначены 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 они применяются для формирования импульсов большой длительности (миллисекунды и секунды) или защитной коммутации цепей постоянного тока.

Принцип ЭЛВ имеет отечественный приоритет и запатентован в ведущих промышленных странах (США, Япония, Италия и др.).

Для успешной работы прибора ЭОС ЭЛВ должна обладать:

высоким потенциалом на ускоряющем электроде для пропускания предельно большого тока при минимальном внутреннем сопротивлении прибора;

глубоким торможением электронов на аноде при тщательном формировании электронного пучка для снижения токовых потерь в целях обеспечения высокого КПД;

крупноструктурными формирующими электродами для повышения токопрохождения, электрической прочности и мощности, рассеиваемой электродами;

малой проницательностью поля анода в область ускорения пучка, обеспечивающей пентодную вольт-амперную характеристику прибора.

Существенным для выбора принципа построения ЭОС ЭЛВ является и то, что отбирающее пучок напряжение в ЭЛВ (рис. 1) прикладывается к зазору между катодом и ускоряющим электродом (анодом пушки), а высокое коммутируемое напряжение падает на промежутке между ускоряющим электродом и коллектором. Отсюда следует, что последний промежуток должен быть больше (желательно значительно больше) чем первый, тем более, что сокращение ускоряющего зазора ведет к увеличению тока катода при выбранном ускоряющем напряжении. Поэтому одной из основных задач при разработке ЭЛВ является создание ЭОС прибора с существенно различной длиной промежутков ускорения и торможения пучка, или с разномасштабными областя-

ми ускорения и торможения. Системы такого типа получили название неравноплечных ЭОС.

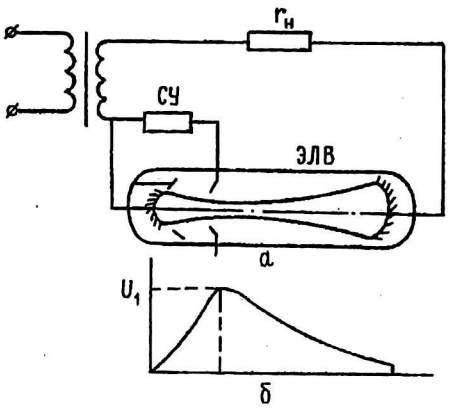


Рис. 1. Схема включения ЭЛВ в цепь (а) и распределение потенциалов по электродам в режиме пропускания тока (б):
$r_н$ — сопротивление нагрузки,
СУ — система управления

Принципы создания неравноплечных ЭОС с глубоким торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям

Уже первые результаты практической реализации принципов, заложенных в основу нового класса приборов, показали их несомненные преимущества по сравнению с параметрами коммутирующих и модулирующих тетродов в традиционном сеточном исполнении [2—4]. Однако использование в первых конструкциях ЭОС с коллектором в виде цилиндра Фарадея [2] не позволяло реализовать все возможности, заложенные в принцип построения данных приборов. Причиной этого являлись физические ограничения по предельно достижимым величинам тока в системах торможения пучка на коллектор полого типа, связанные с провисанием потенциала на входе в коллектор и наличием замкнутого минимума потенциала в коллекторной полости. Обойти эти ограничения удалось при реализации в ЭЛВ иного типа систем торможения — на поверхность, ортогональную траекториям пучка, построенных на основе использования системы центробежно-электростатического формирования (ЦЭФ) пучка [3, 4].

Идея создания неравноплечной ЭОС с глубоким торможением криволинейного пучка на ортогональную поверхность для приборов типа ЭЛВ была предложена авторами работы [5]. Предлагалось использовать ЭОС с ЦЭФ, основанные на идеализированных решениях с траекториями в виде логарифмических спиралей (рис. 2). Достоинством этих ЭОС являлась возможность вынесения ускоряющего электрода из области формируемого электронного потока и глубокого торможения электронов пучка (теоретически, вплоть до нулевого). Недостатками ЭОС с ЦЭФ (ограничивавшими такие важнейшие параметры разрабатываемых на их основе ЭЛВ, как КПД и высоковольтность прибора) являются принципиально свойственные им неравномерность токоотбора по поверхности катода, криволинейность траекторий пучка (уменьшающая междуэлектродные расстояния по сравнению с протяженностью траекторий пучка) и неравномерность распределения мощности пучка по поверхности анода вентиля.

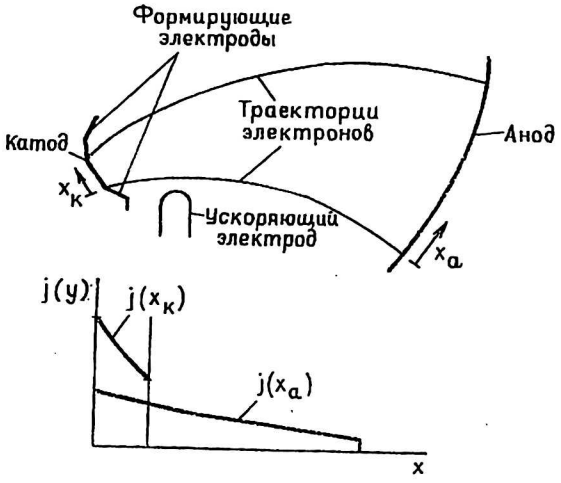


Рис. 2. Схема построения ЭОС ЭЛВ на основе системы центробежно-электростатического формирования пучка

Перспективным направлением создания ЭОС ЭЛВ оказалось предложение использовать системы формирования электронных пучков пирсовского типа в сочетании с системами торможения пучка, являющимися в прианодной области зеркальным отображением области пушки [6, 7]. Впервые реализация подобного подхода описана в работе [8] и сводилась к использованию в лучевом пентоде в качестве системы торможения пучка стандартной пушки Пирса, катод которой служил коллектором электронов (рис. 3). Для задержки вторичных электронов использовалась помещенная перед поверхностью коллектора антидинатронная сетка. При напряжениях на коллекторе около 1 % от анодного удавалось получать 90 % прохождения тока на коллектор. Но применение антидинатронных сеток в мощных приборах, на наш взгляд, недопустимо, а использование принципа симметрии в конструировании пушки и области торможения пучка резко ограничивает высоковольтность и КПД разрабатываемого коммутирующего прибора.

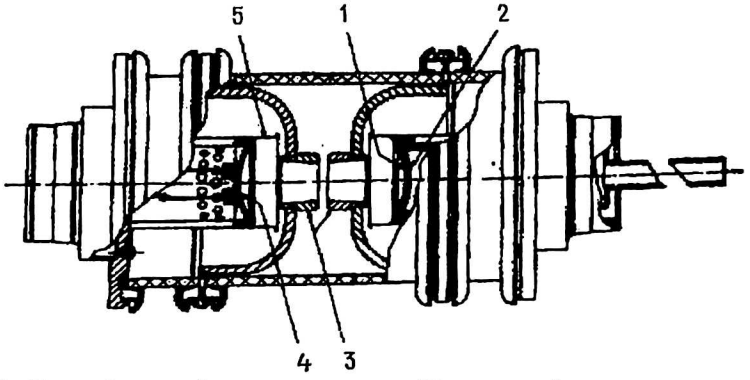


Рис. 3. Лучевой пентод на основе пушки Пирса со сферическим катодом и симметричного пушке сферического коллектора с антидинатронной сеткой:
1 — защитная сетка; 2 — коллектор; 3 — ускоряющий анод;
4 — катод; 5 — управляющий электрод

Построение неравноплечных ЭОС с торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов, послуживших основой для разработки современных конструкций ЭЛВ, основано на «сшивании» любого варианта пушки (включая и пушки с выпуклым катодом) с эквипотенциальным промежутком, и обращенной пушкой, выполняющей функции области торможения пучка (рис. 4). Эквипотенциальный промежуток в подобной ЭОС

предназначен для увеличения поперечных размеров пучка и согласования пушки с областью торможения, причем с возрастанием его длины увеличиваются габариты области торможения и неравноплечность проектируемой системы [7, 9].

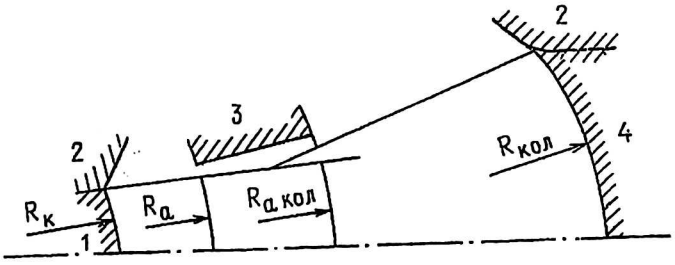


Рис. 4. Схема построения ЭОС ЭЛВ на основе идеализированной неравноплечной ЭОС пирсовского типа:

1 — катод; 2 — фокусирующие электроды; 3 — ускоряющий электрод; 4 — анод вентиля; $R_к$, $R_а$ — радиусы кривизны катода и ускоряющего электрода пушки; $R_{кол}$, $R_{акол}$ — радиусы кривизны нулевой и ускоряющей эквипотенциальных поверхностей области торможения

Параметры системы торможения неравноплечного типа можно однозначно связать с параметрами пушки и согласующего промежутка, если воспользоваться подходом, предложенным в [10] при расчете пушек Пирса с компрессией. В данной работе параметры пучка в пушке и в анодной полости связываются вспомогательной функцией $F(\rho_а)$ и коэффициентом преломления пучка в анодном отверстии $n(\rho_а)$. Применяя такой подход одновременно к пушке и области торможения и используя параксиальное уравнение пучка в эквипотенциальном промежутке можно выразить параметры области торможения (точнее величину вспомогательной функции $F(\rho_{акол})$ для области торможения) через параметры пушки и длину согласующего промежутка.

Для плоскосимметричных систем с ленточными пучками, используемых в современных многолучевых конструкциях ЭЛВ, такая взаимосвязь записывается в следующем виде:

$$F(\rho_{акол}) = \frac{[F(\rho_а) + 2/9\gamma_\alpha z]^2}{F(\rho_а) + \gamma_\alpha F(\rho_а) Z + 1/9\gamma_\alpha^2 Z^2}, \qquad (1)$$

где $Z = z_{экв}/y_а$, причем $Z = 0$, для $\rho_а < 1{,}9$; (2)

$$Z = 9F(\rho_а)/\gamma_\alpha, \text{ для } 1{,}9 < \rho_а < 2{,}84; \qquad (3)$$

$$Z = \frac{9F(\rho_а)}{\gamma_\alpha [1 - \sqrt{1 - 4/9F(\rho_а)}]}, \text{ для } \rho_а > 2{,}84; \qquad (4)$$

$$F(\rho_а) = 4{,}67\gamma_\alpha^2/(P_1 y_а), \quad \rho_а = R_к / R_а, \quad \rho_{акол} = R_{кол} / R_{акол}, \qquad (5)$$

где P_1 — величина удельного первеанса пучка, приходящаяся на единичную ширину катода, мкА/(В$^{3/2}$см);

$y_а$ — полутолщина пучка в плоскости анода;

γ_α — угол расходимости граничных траекторий пучка после преломления в анодном отверстии пушки;

$z_{экв}$ — протяженность эквипотенциального промежутка;

$R_к$, $R_а$, $R_{кол}$, $R_{акол}$ — радиусы кривизны катодной и ускоряющей эквипотенциалей пушки и, соответственно, нулевой (коллекторной) и ускоряющей эквипотенциалей области торможения.

Для сравнения между собой различных вариантов неравноплечных систем с торможением пучка был введен параметр, названный коэффициентом неравноплечности системы и характеризующий превышение протяженности междуэлектродного зазора в области торможения к длине промежутка между катодом и анодом пушки. Величину коэффициента неравноплечности, определяемую как отношение расстояния «катод-анод» области торможения к аналогичному расстоянию в пушке

$$k = (R_{кол} - R_{акол})/(R_к - R_а), \qquad (6)$$

можно найти с использованием выше приведенного соотношения (1) и уравнения граничной траектории пучка в эквипотенциальном промежутке.

Для плоскосимметричных электронно-оптических систем с торможением ленточных электронных пучков коэффициент неравноплечности выражается соотношением:

$$k = \frac{(\rho_{акол} - 1)n(\rho_{акол})}{(\rho_а - 1)n(\rho_а)} \frac{1 + \gamma_\alpha Z + \gamma_\alpha^2 Z^2/(9F(\rho_а)}{1 + \frac{2}{9}\gamma_\alpha \frac{Z}{F(\rho_а)}}. \qquad (7)$$

Из приведенных соотношений следует, что для увеличения коэффициента неравноплечности ЭОС необходимо применение протяженных согласующих промежутков, в которых возрастает поперечный размер пучка по сравнению с размером на выходе из пушки [13]. Кроме того, очевидно, что прикатодную область ЭЛВ выгодно строить на основе использования выпуклых, а не вогнутых катодов, поскольку в этом случае длина промежутка согласования пушки с областью торможения получается наименьшей.

Для создания на основе неравноплечных ЭОС мощных коммутирующих приборов типа ЭЛВ необходимо решить проблему задержки вторичных электронов. Это возможно путем введения в области торможения прианодного электрода с низким потенциалом [10, 14, 18] или защитного электрода [9, 12, 19], размещенного вблизи ускоряющего и имеющего потенциал катода. Задача этих электродов — обеспечить формирование минимума потенциала в поперечном сечении пучка.

Неравноплечные ЭОС с защитным электродом

Проводимые исследования показали, что перспективным направлением улучшения параметров современных мощных электронно-лучевых коммутирующих приборов является применение в пирсовских неравноплечных ЭОС защитного электрода, высокая эффективность которого была доказана при экспериментальном исследовании систем торможения электронного пучка [11, 19]. Отражая от ускоряющего электрода большую часть спектра вторичных электронов, защитный электрод позволяет конструировать приборы с малым уровнем токовых потерь (до 1 % от величины катодного тока и менее [9, 11]) и малой мощностью системы управления. При этом упрощается задача охлаждения ускоряющего электрода ЭЛВ и отпадает необходимость в дополнительном источнике питания.

Следует отметить, что определенная сложность конструирования приборов на основе ЭОС с защитным электродом заключается в том, что использовать при их численном проектировании программы синтеза на сегодняшний день проблематично вследствие значительной неламинарности траекторий пучка в подобных системах и неприспособленности существовавших методов синтеза к таким задачам. Вследствие этого требовалась разработка специализирован-

ной методики численного проектирования и оптимизации пирсовских ЭОС с защитным электродом.

Заметим, что, являясь более эффективным средством защиты ускоряющего электрода от вторичной эмиссии по сравнению с прианодными электродами, защитный электрод вызывает наиболее резкое снижение потенциала в области торможения и возрастание плотности объемного заряда первичного пучка. Введение защитного электрода приводит еще и к значительному изменению условий формирования первичного пучка в области торможения. Причина этого в том, что защитный электрод с катодным потенциалом, введенный в непосредственной близости к высокопотенциальному ускоряющему электроду, образует сильную несимметричную одиночную электростатическую линзу. При этом наибольшему фокусирующему действию подвергаются удаленные от оси периферийные электроны, что подтверждают результаты численного моделирования неравноплечных ЭОС с защитным электродом (рис. 5). Влияние линзы на центральные (приосевые) электроны пучка минимально (см. рис. 5, *а*), вследствие чего эти невозмущенные линзой электроны могут проходить на анод даже в режимах частичного отражения электронов пучка (см. рис. 5, *б*). В то же время линза защитного электрода, фокусируя граничные электроны пучка, уменьшает поперечную компоненту их скорости, что сказывается положительным образом на улучшение условий торможения пучка в номинальном режиме (см. рис. 5, *в*). И, наконец, приведенный на рис. 5, *г* траекторный анализ варианта ЭОС с защитным электродом, полученный для режима отражения пучка от коллектора, хорошо демонстрирует характерную особенность работы защитного электрода — способность возвращать обратно на анод часть отраженных им периферийных электронов.

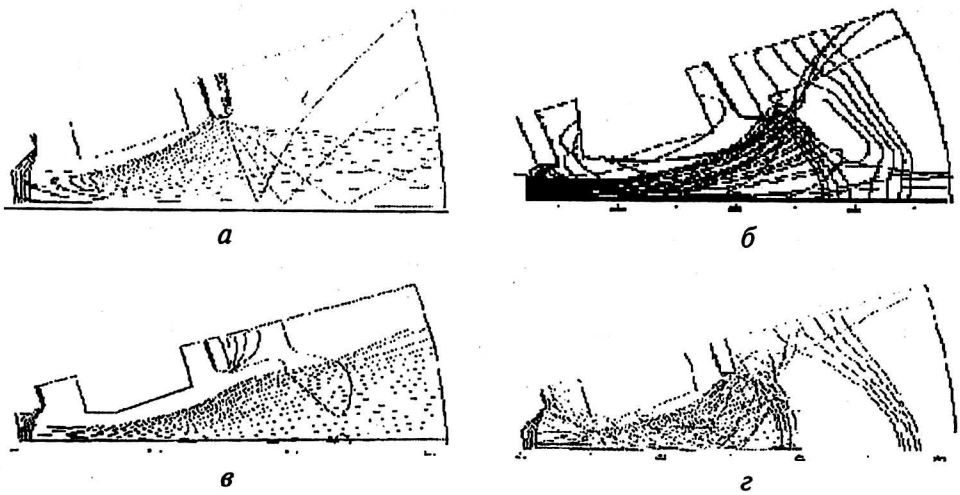


Рис. 5. Результаты численного моделирования вариантов неравноплечных ЭОС ЭЛВ с защитным электродом

Детальный анализ приведенных выше соотношений (1—7) показывает, что для максимального увеличения межэлектродного промежутка в области торможения неравноплечной ЭОС при заданной полной длине системы (или минимальных габаритах) целесообразно наряду с протяженным эквипотенциальным промежутком использовать пушку с выпуклым катодом. Наличие протяженного эквипотенциального промежутка повышает степень экранировки пушки и области торможения, что существенно с точки зрения получения в приборе пентодной вольт-амперной характеристики.

Использование в пушке при заданной общей длине системы плоского катода ведет к снижению первеанса пропускаемого через неравноплечную ЭОС пучка или к уменьшению протяженности области торможения (сокращению высоковольтного зазора). Данное замечание еще более актуально в случае использования в ЭОС ЭЛВ пушек с вогнутым катодом, формирующих сходящийся в пушке пучок, что приводит еще и к резкому снижению величины погонного первеанса по сравнению с упомянутыми выше вариантами пушек. Кроме того, компрессия пространственного заряда пучка в согласующем промежутке вызывает (в соответствии с приведенным выше соотношением для коэффициента неравноплечности) дополнительное снижение допустимой длины высоковольтного зазора при заданных габаритах проектируемой ЭОС и потенциале анода.

Методика расчета неравноплечных пирсовских ЭОС с антидинатронным минимумом потенциала в области торможения

В практике разработок конкретных вариантов ЭЛВ потребность сочетания максимальных величин коммутируемого тока и напряжения коммутации при ограниченных габаритных размерах самого прибора заставляет зачастую разработчиков чрезмерно увеличивать высоковольтный зазор при уменьшении протяженности ускоряющего электрода, что, как уже отмечено выше, влечет за собой повышение потенциала на аноде вентиля и соответствующее возрастание мощности потерь в приборе. Разработка, как правило, проводится методом траекторного анализа без оценки предельно допустимых соотношений величины тока пучка с длиной межэлектродного высоковольтного зазора и глубиной торможения.

В связи с изложенным была поставлена задача создания методики расчета неравноплечных пирсовских ЭОС, в которой на основе аналитических соотношений можно связать величину пропускаемого тока с глубиной торможения при учете наличия минимума потенциала в области торможения. Разрабатываемая методика предназначалась для расчета параметров проектируемых многолучевых конструкций ЭЛВ с ленточными пучками. Методика расчета ЭОС ЭЛВ была создана с использованием разработанных ранее алгоритмов [9, 16, 22] в виде программного комплекса в среде Mathcad 2000 Pro. Методика базируется на использовании квазиодномерных приближений и позволяет проводить полный расчет неравноплечных пирсовских ЭОС с глубоким торможением интенсивного электронного пучка и учетом наличия антидинатронного минимума потенциала в области торможения.

На рис. 6 представлена схематически последовательность этапов расчета неравноплечных ЭОС ЭЛВ. В процессе проводимого расчета можно выделить ряд различных по решаемым задачам этапов, в основе которых лежат разные алгоритмы и используемые расчетные методы. Первый этап (см. рис. 6, *а*) базируется на решении задачи приближенного синтеза идеализированных пирсовских систем и включает расчет пучка в пушке, согласующем промежутке и области торможения электронов на нулевую эквипотенциаль [7]. Этот этап основан на использовании приведенных выше соотношений и дополнен алгоритмом приближенного расчета коэффициента увеличения высоковольтного зазора проектируемой ЭОС за счет повышения потенциала на аноде. Получаемые на этом этапе результаты могут уже использоваться в качестве исходных данных для проведения численного моделирования варианта ЭОС ЭЛВ. Следующий этап позволяет рассчитывать параметры системы тор-

можения расходящегося ленточного пучка с учетом минимума потенциала перед поверхностью анода (см. рис. 6, *б*).

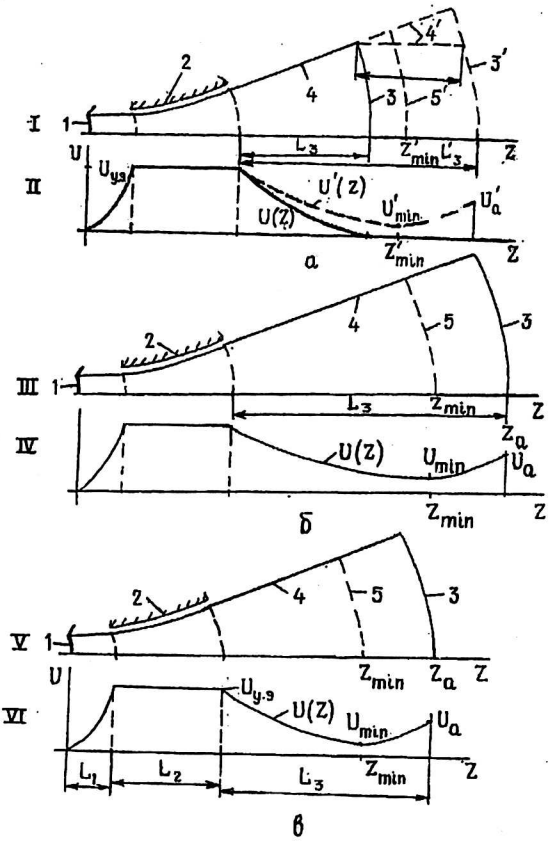


Рис. 6. Этапы инженерного расчета (а, б, в) пирсовских неравноплечных ЭОС ЭЛВ:
1 — катод; 2 — ускоряющий электрод; 3 — анод вентиля; 4 — граничная траектория пучка; 5 — поверхность минимума потенциала.
I, II — схема ЭОС и распределение потенциала на оси при расчете идеализированной неравноплечной ЭОС с торможением пучка на нулевую эквипотенциаль (3) или полученную приближенным одномерным анализом поверхность анода с ненулевым потенциалом;
III, IV — схема ЭОС и распределение осевого потенциала при расчете пирсовской ЭОС с антидинатронным минимумом потенциала в области торможения расходящегося ленточного пучка;
V, VI — схема ЭОС и распределение осевого потенциала при расчете пирсовской ЭОС с учетом вторичной эмиссии с анода

Третий этап расчета (см. рис. 6, *в*) позволяет учитывать влияние пространственного заряда вторичных электронов на самосогласованное поле в системе торможения пучка с минимумом потенциала. Это позволяет также оценить уровень токовых потерь, вызванных отражением электронов в различных режимах работы проектируемой ЭОС. Результаты расчета дают полную информацию для проведения численного моделирования ЭОС проектируемого прибора.

Рассмотрим более подробно содержание этапов расчета. Для начала необходимо задать размеры и параметры катода, обусловленные для ленточных ЭОС выбором общего диаметра катодного узла, количества лучей в приборе и режимов работы пушки. В качестве начальных данных задаются величина потенциала на ускоряющем электроде (аноде пушки), радиус кривизны выпуклого катода, полуширина участка его эмитирующей поверхности и расстояние между катодом и анодом пушки (определяющее радиус кривизны анода пушки). Для расчета параметров пучка на входе в область торможения задается также длина согласующего эквипотенциального промежутка $z_{экв}$ (см. рис. 6, *а*).

В разработанных программах используются аналитические представления для всех функций, необходимых при расчете параметров пучка и геометрии проектируемой ЭОС. В частности, функция Лэнгмюра $\beta^2(\rho_a)$ для цилиндрического диода с выпуклым катодом, необходимая для расчета пучка в пушке, вводится в программу в виде отрезка степенного ряда:

$$\beta^2(\rho_a) = \left[\ln(\rho_a) - \frac{2}{3}(\ln(\rho_a))^2 + \frac{11}{120}(\ln(\rho_a))^3 - \frac{47}{3300}(\ln(\rho_a))^4\right]^2, \quad (8)$$

где ρ_a — отношение радиусов кривизны катода и анода.

Такое представление обеспечивает достаточную точность расчета во всем диапазоне интересующих нас конструктивных параметров неравноплечных ЭОС.

Аналогично, производная от функции Лэнгмюра $n(\rho_a) = d(\beta^2)/d(\rho_a)$, используемая при вычислении коэффициента преломления ленточного электронного пучка в щелевой линзе ускоряющего электрода (на входе в согласующий промежуток) представляется соотношением:

$$n(\rho_a) = \sqrt{\beta^2}\left[\rho_a - \frac{8\rho_a}{5}\ln(\rho_a) + \frac{11\rho_a}{20}(\ln(\rho_a))^2 - \frac{376\rho_a}{3300}(\ln(\rho_a))^3\right]. \quad (9)$$

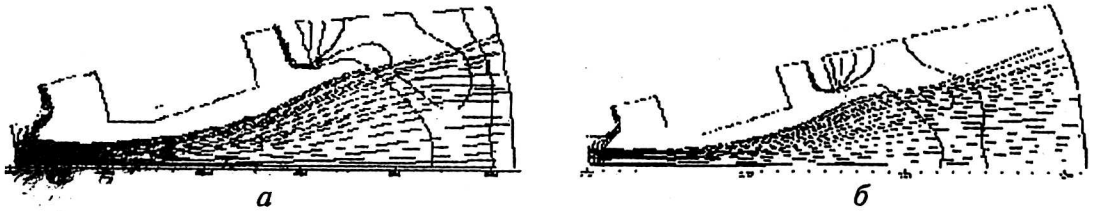
Связь параметров пучка на входе в область торможения с параметрами самой области торможения для рассматриваемых систем с ленточными пучками записывается с использованием функции Лэнгмюра для цилиндрических диодов с внешним катодом $\beta^2(\rho)$ в виде соотношения [30]:

$$\beta^2(\rho)n^2(\rho) = 4{,}67 \cdot 10^{-6}\frac{\gamma^2 U_a^{3/2}}{x(z_{экв})I_1},$$

где $n(\rho)$ — коэффициент преломления граничной траектории ленточного пучка в щелевой линзе на входе в область торможения, причем для расчета функций $\beta^2(\rho)$ и $n(\rho)$ в разработанных программах используются приближенные аналитические представления, аналогичные (8) и (9).

В результате выполнения первого этапа расчета вычисляются параметры идеализированной неравноплечной ЭОС с торможением пучка на нулевую эквипотенциаль (см. рис. 6, *а*), что позволяет оценить длину высоковольтного промежутка и расходимость пучка в области торможения проектируемого прибора при выбранных исходных данных [16—22].

Полученные при расчете данные можно использовать в качестве исходных для численного моделирования модуля многолучевого ЭЛВ [16]. Результаты проведенного численного моделирования варианта ЭОС, представленные на рис. 7, *а*, подтверждают возможность достижения глубокого торможения ленточного пучка (вплоть до 5 % потенциала на поверхности анода) при сохранении основных геометрических размеров электродов системы, соответствующих полученным по предложенной методике расчета. Оценка правильности результатов расчета, проведенная путем численного моделирования ЭОС (см. рис. 7, *а*), показала также удовлетворительное совпадение величин погонного первеанса пучка и удельной плотности катодного тока (в пределах 10—15 %). Еще меньше расхождение между полученной численно шириной пучка на поверхности анода проектируемой ЭОС и аналитически рассчитанным значением (1,68 и 1,55 см, т. е. менее 10 %).



а *б*

Рис. 7. Результаты численного моделирования вариантов ЭЛВ 4/40, разработанных с использованием методики расчета ЭОС ЭЛВ:

а — вариант ЭОС с диаметром анода 70 мм; *б* — вариант ЭОС с диаметром анода 90 мм

Необходимость использования минимума потенциала для задержки вторичных электронов приводит к увеличению протяженности высоковольтного зазора и повышению потенциала анода. При этом требуется иметь возможность оценки взаимосвязи предельного тока и минимума потенциала при выбранном соотношении потенциалов анода и ускоряющего электрода в приборе. Простейшее рассмотрение этого вопроса можно провести в одномерном приближении.

Решение задачи о транспортировке одномерного пучка в плоскопараллельной системе электродов анод—коллектор показывает, что с ростом потенциала коллектора при неизменной плотности инжектируемого в промежуток тока расстояние между электродами можно увеличивать без наступления режима виртуального катода в соответствии с соотношением:

$$z / z_{к-а} = \left[1 + \sqrt{U_{кол} / U_а}\right]^{3/2}, \qquad (10)$$

где $U_{кол}$ — величина потенциала на аноде прибора;

$z_{к-а}$ — расстояние между катодом и анодом в эквивалентном плоском лэнгмюровском диоде с такими же величинами плотности тока j и ускоряющего потенциала $U_а$, соответствующими уравнению (10).

Расчеты по формуле (10) показывают, что повышение потенциала на аноде от нуля до 10 % ускоряющего потенциала позволяет на 51 % увеличить междуэлектродный зазор, 20%-ный анодный потенциал удлиняет зазор на 74 %, а при 30%-ном торможении пучка на аноде расстояние между электродами можно увеличить почти в два раза (на 92,5 %). С учетом линейного характера снижения плотности тока в ленточном пучке при увеличении высоковольтного промежутка ускоряющий электрод—анод использование соотношения (10) для предварительного расчета при проектировании многолучевых ЭЛВ дает вполне приемлемую точность.

Более точные результаты дает расчет расходящихся в области торможения ленточных пучков в системе цилиндрических электродов. В качестве начальных данных в разработанной для этого расчета программе задаются значения радиальной компоненты напряженности электрического поля на входе в область торможения и длины участка торможения ленточного пучка. Задача расчета распределения потенциала (Y<1>) в области торможения (Y<2>) решается численно, с использованием алгоритма Рунге—Кутта, получаемый в результате график распределения потенциала представлен на рис. 8.

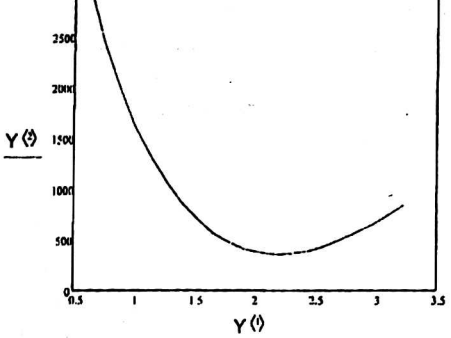


Рис. 8. Расчетное распределение потенциала в области торможения расходящегося ленточного пучка в цилиндрической системе электродов

Вычисление допустимого значения минимума потенциала при заданном потенциале анода в отсутствии режима виртуального катода (или, наоборот, предельной величины потенциала анода при заданном значении потенциала в минимуме) в предлагаемой методике расчета неравноплечных пирсовских

ЭОС можно проводить, как уже упомянуто выше, с использованием результатов анализа одномерного пучка, с помощью которого можно рассчитать коэффициент увеличения пропускаемого междуэлектродным промежутком тока (по сравнению с током лэнгмюровского диода) за счет повышения потенциала, а также получить зависимость между предельно допустимым значением потенциала в минимуме и величиной потенциала анода в отсутствии режима виртуального катода, выражаемую следующим соотношением:

$$U_{\min} = U_{\text{кол}}\left(1 + \sqrt{U_{\text{кол}}}\right)^{-2}.$$

Использование программы расчета распределения потенциала в области торможения расходящегося ленточного пучка вместо приближенной оценки по одномерному плоско параллельному решению дает заметное увеличение длины высоковольтного зазора. Так, для проектируемой системы ЭЛВ 4/40 при 25%-ном потенциале анода расчет области торможения в цилиндрическом приближении дает увеличение высоковольтного зазора на 20 % по сравнению с одномерной оценкой по соотношению (10).

Анализ ЭОС торможения ленточного расходящегося пучка с учетом вторичной эмиссии

Задача расчета распределения потенциала в области торможения ленточного расходящегося пучка с учетом вторичной эмиссии (при найденных на предыдущем этапе расчета значениях радиуса кривизны цилиндрической поверхности входа пучка в область торможения, плотности тока на входе, значениях потенциалов в минимуме и на аноде) в разработанной методике расчета ЭОС ЭЛВ решается численно, с использованием алгоритма Рунге—Кутта.

Исходными данными для расчета являются радиус кривизны ускоряющей эквипотенциальной поверхности области торможения $R_{\text{акол}}$ и плотность тока на этой поверхности $i_{\text{акол}}$, радиусы кривизны поверхности с минимальным потенциалом $R_{\min}$ и поверхности коллектора $R_{\text{кол}}$, а также величины потенциалов на ускоряющем электроде, в минимуме и на аноде ($U_{\text{уэ}}$, $U_{\min}$, $U_{\text{кол}}$). Для работы программы необходимо задать численные значения всех перечисленных величин.

Для анализируемого варианта (с учетом потенциала и материала анода) из имеющихся в литературе данных необходимо определить численные значения коэффициентов вторичной эмиссии различных энергетических групп вторичных электронов (δ— коэффициент истинно вторичной эмиссии, η — коэффициент неупругого рассеяния и τ — коэффициент упругого отражения), а также необходимое для проведения анализа значение энергии, соответствующее пику истинно вторичной эмиссии.

Функцию, задающую энергетический спектр вторичных электронов на поверхности коллектора, можно представить в виде:

$$f(v_2) = \frac{\delta v_2 \exp\left(-\dfrac{v_2^2}{2v_i^2}\right)}{v_i^2\left[1 - \exp\left(-\dfrac{v_к^2}{2v_i^2}\right)\right]} + \frac{\eta v_2}{\left[v_к - k_n v_i \ln\left(1 + \dfrac{v_к}{k_i v_i}\right)\right](v_2 + k_i v_i)} + \\ + \frac{1}{k_1}\exp\left[-k_2^2\frac{(v_2 - k_3 v_к)^2}{2v_к^2}\right], \qquad (11)$$

где переменная v_2 — текущая величина скорости вторичного электрона;

v_i — величина начальной скорости вторичных электронов, соответствующая пику истинно вторичной эмиссии;

$v_к$ — скорость первичных электронов на коллекторе;

k_i, k_1, k_2, k_3 — величины поправочных коэффициентов, подбираемых из условия соответствия выражения, аппроксимирующего энергетический спектр вторичных электронов, кривой энергетического распределения вторичных электронов для выбранного материала и расчетного потенциала анода, соответственно, причем коэффициент k_1 вычисляется по формуле:

$$k_1 = \int_0^{v_к} \exp\left[-\frac{k_2^2 (v_{вт} - k_3 v_к)^2}{2v_к^2}\right] d_{вт},$$

а значения коэффициентов k_2, k_3 выбираются из условий $k_2 >> 1$, $k_3 \approx 1$ (для энергий первичных 300 эВ — 3 кэВ следует выбирать $k_2 \sim 10^2$—10^3 и $k_3 \sim 0{,}95$—$0{,}99$).

Парциальную часть пространственного заряда вторичных электронов, проходящих сквозь минимум потенциала к ускоряющему электроду, можно записать в виде функции $f_ρ$ от величины потенциала U в текущей точке области торможения:

$$f_ρ = \int_{v_{min}}^{v_к} \left[\frac{f(v_2)}{\sqrt{v_2^2 - v_к^2 + 2\frac{e}{m}U}}\right] dv_2.$$

Полученные соотношения позволяют далее перейти непосредственно к решению задачи расчета распределения потенциала в промежутке между минимумом потенциала и ускоряющим электродом с учетом влияния проходящих сквозь минимум вторичных электронов. Для проведения такого расчета необходимо задать плотность тока на поверхности минимума потенциала.

$$i_{акол} = (i_{акол} R_{акол}) / R_{min}.$$

В результате интегрирования уравнения Пуассона от поверхности минимума потенциала получаем значения текущего радиуса, потенциала и радиального электрического поля в промежутке между ускоряющим электродом и минимумом потенциала области торможения. Проведенный расчет позволяет построить зависимость потенциала вдоль траектории расходящегося от ускоряющего электрода к минимуму потенциала ленточного электронного пучка с учетом влияния пространственного заряда вторичных электронов.

Аналогичным образом решается задача для области между минимумом потенциала и коллектором, но при этом учитываются также энергетические группы медленных вторичных электронов, отражающихся от различных точек минимума потенциала и возвращающихся на коллектор.

При этом парциальная доля пространственного заряда медленных вторичных электронов, отражающихся минимумом потенциала обратно к аноду, учитывается отдельной функцией $f_{ρ2}$, записываемой следующим образом:

$$f_{ρ2} = 2\sqrt{2\frac{e}{m}} \int_{\sqrt{2\frac{e}{m}(U_к - U)}}^{\sqrt{2\frac{e}{m}(U_к - U_{min})}} \left[\frac{f(v_2)}{\sqrt{v_2^2 - v_к^2 + 2\frac{e}{m}U}}\right] dv_2.$$

Решение задачи находится так же, как и в предыдущем случае с использованием стандартного метода Рунге—Кутта.

Проводимый расчет в свою очередь дает распределение потенциала вдоль траектории ленточного электронного пучка, расходящегося от минимума потенциала к поверхности анода проектируемого варианта ЭОС ЭЛВ, с учетом влияния пространственного заряда эмиттированных анодом вторичных электронов.

Результаты, полученные при проведении расчетов ЭОС с учетом вторичной эмиссии, позволяют скорректировать размеры высоковольтного зазора и анода для сохранения в рассчитанном приборе заданной глубины торможения пучка и величины потенциала в минимуме. К примеру, реальное сокращение высоковольтного зазора в области 25%-ного торможения пучка на аноде в проектируемом варианте ЭЛВ 4/40 по расчетам составляет порядка 30 %.

Анализ возможного уровня токовых потерь в системах торможения пучка с минимумом потенциала с учетом углового распределения вторичных электронов

Выбранный алгоритм представления распределения вторичных электронов по скоростям дает хорошее совпадение с реальным распределением как отдельных энергетических групп вторичных, так и всего вторично-эмиссионного энергетического спектра.

Распределения всех энергетических групп вторичных электронов по скоростям, соответствующие предложенному соотношению (11), приведены на рис. 9.

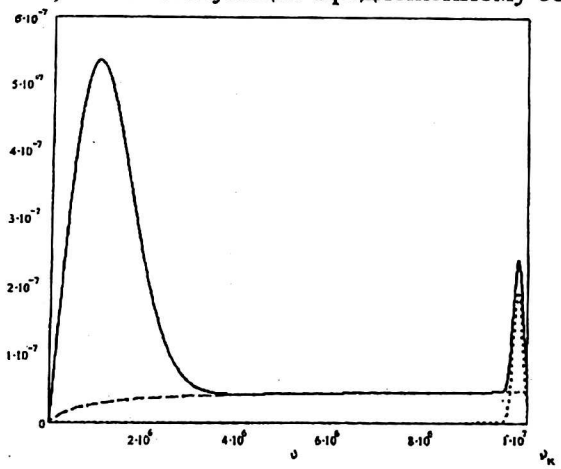


Рис. 9. Кривая аппроксимации распределения вторичных электронов по скоростям вылета v из поверхности анода вентиля при энергии падения первичных электронов 0,3 кэВ, материал анода — медь:
—— $f(v)$ — суммарное распределение всех групп вторичных электронов;
··· $f_1(v)$ и - - - $f_2(v)$ — распределения истинно вторичных и неупругорассеянных электронов, соответственно

При расчете одномерных ЭОС с вторичной эмиссией не учитывалось угловое распределение вторичных электронов, от которого, как показывают проведенные ранее расчеты коллекторных систем типа цилиндра Фарадея [16], существенно зависит в первую очередь доля вторичных электронов, попадающая из анода в область ускоряющего электрода и определяющая величину токовых потерь в приборе. Для того чтобы учесть этот эффект, необходимо из приведенного распределения вторичных по полным скоростям вылета из анода получить распределение по ортогональным компонентам начальной скорости вторичных электронов. Наличие распределения по нормальным скоростям вылета вторичных позволит при заданном потенциале анода и расчетной величине минимума потенциала вычислять долю вторичных электронов, проходящих сквозь минимум в высокопотенциальную область ЭОС, и оценивать таким образом ожидаемые токовые потери в проектируемом приборе.

В соответствии с изложенным выше алгоритмом задания вторичной эмиссии и косинусоидальным характером углового распределения подавляющего большинства вторичных электронов [20] доля вторичных электронов, обладающих начальной скоростью v_2 и ортогональной компонентой начальной скорости v_n может быть записана в виде:

$$dF(v_n) = \frac{f(v_2)\cos\theta \cdot 2\pi \sin\theta \cdot \cos\theta\, d\theta}{k_n},$$

где нормирующий коэффициент $k_n = 2\pi/3$, а угол θ связан с выбранными величинами v_2 и v_n соотношением:

$$\cos\theta = v_n/v_2.$$

Распределение вторичных электронов по нормальным составляющим скорости вылета из анода можно записать в виде интеграла:

$$F(v_n) = 3\int_{v_n}^{v_к}\left(\frac{v_n^3}{v_2^4}\right) f(v_2)dv_2,$$

где распределение $f(v_2)$ определяется выражениями (11).

График зависимости распределения вторичных электронов по ортогональным компонентам начальной скорости вылета из коллектора представлен на рис. 10, где приведены соответствующие парциальные вклады, вносимые в найденное распределение упругоотраженными и неупругорассеянными вторичными электронами.

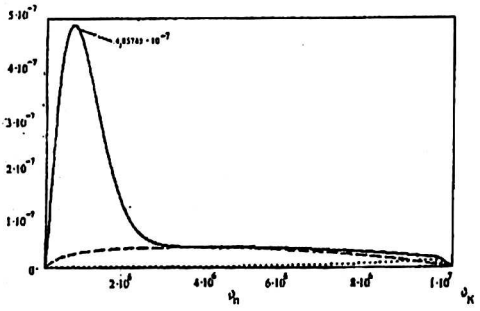


Рис. 10. Распределение вторичных электронов по нормальным составляющим v_n скоростей вылета из поверхности анода с учетом косинусоидального характера углового распределения вторичных при энергии падения первичных электронов 0,3 кэВ, материал анода — медь:
— $F(v_n)$ — суммарное распределение всех групп вторичных электронов;
- - - $F_2(v_n)$ — неупругорассеянные электроны;
· · · · $F_i(v_n)$ — упругоотраженные электроны

Сравнение данных зависимостей с представленными на рис. 9 показывает, что угловое распределение вторичных электронов значительно изменяет долю вторичных, способных преодолеть потенциальный барьер, формируемый в области торможения пирсовских неравноплечных ЭОС ЭЛВ.

Полученные уравнения позволяют рассчитать долю вторичных электронов (относительно тока первичного пучка), проходящих минимум потенциала:

$$kI_{Вт} = 3\int_{v_{min}}^{v_к}\left(\int_{v_n}^{v_к}\left(\frac{v_n^3}{v_2^4}\right) f(v_2)dv_2\right)dv_n. \qquad (12)$$

Нижний предел интегрирования связан с потенциалом минимума соотношением:

$$v_{min} = (2\eta U_{min})^{1/2}.$$

В качестве примера можно привести результаты расчета варианта ЭОС ЭЛВ, в области торможения которой с учетом влияния вторичных образуется минимум потенциала U_{min} = 170 В, при значении потенциала анода $U_{кол}$ = 300 В.

Предполагая, что в качестве материала анода используется медь, можно в соответствии с данными, приведенными в [18], задать величины коэффициентов эмиссии энергетических групп вторичных электронов: $\delta = 0{,}8$; $\eta = 0{,}4$; $r = 0{,}05$, соответствующие выбранному значению энергии первичных электронов. Решая уравнение (12) при заданных параметрах получим величину доли тока вторичных электронов, проходящих в область ускоряющего электрода $\Delta I_{\text{вт}} = 0{,}058$.

Оценивая полученный результат отметим, что некоторая часть прошедших сквозь минимум потенциала быстрых вторичных электронов может вернуться обратно на анод в результате отражения в прикатодной области пушки или полем защитного электрода. Таким образом, полученную величину можно рассматривать как верхний предел возможных токовых потерь в проектируемом варианте прибора при условии отсутствия прямого токоперехвата на ускоряющем электроде и отражения первичных электронов в области торможения, вызванных погрешностями технологии изготовления и сборки прибора.

Представленные алгоритмы учета влияния вторичной эмиссии на работу электронно-лучевых приборов с интенсивными электронными пучками были применены при разработке новых вариантов коммутирующих приборов, превосходящих по параметрам существующие в настоящее время аналоги. В то же время разработанные алгоритмы задания энергетического и углового распределения вторичных электронов могут использоваться в современных пакетах программ численного анализа ЭОС, позволяя автоматизировать процесс задания вторичной эмиссии. Достоинством данных алгоритмов является высокая степень совпадения аппроксимирующих распределений с известными экспериментальными данными.

Заключение

Сформулированы принципы построения пирсовских неравноплечных ЭОС с глубоким торможением электронных пучков для современных мощных электронно-лучевых коммутирующих приборов, заключающиеся в сочетании расходящихся от катода пучков, протяженных согласующих промежутков и антидинатронных электродов в области торможения, создающих минимум потенциала в поперечном сечении пучка. Детально проработаны проблемы численного проектирования на основе неравноплечных ЭОС многолучевых конструкций высоковольтных электронно-лучевых вентилей. В основу разработанного метода проектирования таких ЭОС положено комплексное использование методик расчета, позволяющих по заданным характеристикам прибора провести оценку основных электрических и геометрических параметров проектируемого варианта ЭОС, и последующего численного моделирования ЭОС ЭЛВ с учетом вторичной эмиссии с анода прибора на основе специально разработанных программ.

Литература

1. А. с. 367482, БИ, 1973, № 8, МКИ Н 01 21/10// Будкер Г. И., Переводчиков В. И.

2. *Переводчиков В. И., Скибитянский Д. А.* Экспериментальное исследование процесса глубокого торможения электронных потоков в коллекторе типа цилиндра Фарадея//Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1970. № 7. С. 74—80.

3. *Переводчиков В. И.*// Электротехника, 1980. № 6.

4. *Переводчиков В. И., Шапенко В. Н.* Электронно-оптическая система с центробежно-электростатическим формированием и глубоким торможением электронов//Задачи физической электроники. — М.: Наука, 1982. С. 218—221.

5. *Чернов З. С., Бернашевский Г. А.* Принципы построения ЭЛВ с центробежно-электростатическим формированием электронного потока// Новые мощные высоковольтные коммутирующие приборы — электронно-лучевые вентили: Обзорн. информ. — М.: Информэлектро. 1973. С. 10—12.

6. *Акимов П. И., Переводчиков В. И.*// III Украинская республиканская конференция по электронной оптике и ее применениям: Тез. докл. Ч. 1. — Харьков, 1974. С. 4.

7. *Акимов П. И., Переводчиков В. И.* К вопросу о построении электронно-оптических систем с глубоким торможением и оседанием пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов// Задачи физической электроники. — М.: Наука. 1982. С. 144—152.

8. *Dunn D., Borgi R., Morwood R.*// Microwaves Proc. of the 4-th Intern. Congress on Microwaves Tubes, Scheweningen (Holland), 1962. P. 526.

9. *Акимов П. И.* Разработка электронно-оптических систем электронно-лучевых вентилей. Дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. — М., 1975.

10. *Алямовский И. В.* Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Сов. радио, 1966.

11. А. с. 483054, по заявке № 1872499 с приор. от 17.01.73/*Акимов П. И.*

12. *Тараненко В. П., Дереновский М. В.* О выборе формы электродов электронно-лучевых приборов типа О, работающих с рекуперацией энергии электронов// Известия вузов. Сер. Радиотехника. 1961. Т. IV. № 6. С. 719—721.

13. *Акимов П. И., Нагучев О. Ю., Шеметов М. П.* Трансаксиальные электронно-оптические системы для ЭЛВ// Новые мощные высоковольтные коммутирующие приборы — электронно-лучевые вентили. Обзорная информация. — М.: Информэлектро. 1973. С. 18—22.

14. А. с. 457409, по заявке № 1817665 от 10.08.72./*Акимов П. И., Нагучев О. Ю.*

15. *Акимов П. И., Верстакова Е. А., Данилов В. А., Цхай А. Б.* Расчет мощного электронно-лучевого прибора коммутирующего типа// Сб. Импульсные электромеханические и полупроводниковые преобразователи энергии. — Куйбышев, 1978. С. 135—142.

16. *Переводчиков В. И., Шапенко В. Н., Акимов П. И.* Электронно-оптические системы высоковольтных коммутирующих электронных приборов// Радиоэлектроника, 1997. Т. 42. № 3. С. 361—370.

17. *Акимов П. И.* Электронно-оптические системы с глубоким торможением электронных потоков// Там же. 1998. Т. 43. № 7. С. 872—881.

18. *Бронштейн И. М., Фрайман Б. С.* Вторичная электронная эмиссия. — М.: Наука, 1969.

19. *Акимов П. И., Панибрацкий В. А., Свешников В. М.* Пакет прикладных программ для расчета задач электронной оптики на персональных ЭВМ//III Межд. конф. по электронно-лучевым технологиям. — Варна, 1991. С. 48—54.

20. *Переводчиков В. И., Нагучев О. Ю.*//РЭ. Т. XXVIII, № 6. С. 1198.

21. *Переводчиков В. И., Логинов Л. В., Шапенко В. Н. и др.*//Электротехника, № 4, 1983.

22. *Цхай А. Б.* Методы расчета вакуумных и газонаполненных электронно-оптических систем. Дис. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. — М., 1985.

Principles of a construction and numerical projection of electron-optical systems of powerful commuting devices

P. I. Akimov, V. I. Perevodchikov
The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The paths of creation of systems of shaping of electron beams for powerful commuting devices and problems originating at a realization of indicated systems are considered. The principles of unsymmetrical electron optical systems (EOS) construction with deep deceleration of a beam for electron-beam switches (EBS) are formulated. The basic positions of the developed technique of calculation EOS, permitting are described to carry out (spend) calculation EOS EBS in view of a secondary emission from the device anode.