

УДК 537.533

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ГЛУБОКОГО ТОРМОЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

П. И. Акимов

Всероссийский электротехнический институт, Москва, Россия

Представлены пути построения систем глубокого торможения моноэнергетических или слабозмущенных интенсивных электронных пучков для мощных электронно-лучевых приборов и устройств, а также проблемы, возникающие при реализации указанных систем. Рассмотрены основные принципы построения и методика расчета систем с глубоким торможением для электронно-лучевых приборов коммутационного типа. Предложены способы подавления вторичной эмиссии с коллектора.

Задача глубокой рекуперации энергии интенсивных высокоперевансных незмущенных или слабозмущенных электронных потоков возникает при проектировании таких приборов как электронно-лучевые вентили и коммутаторы, приборы СВЧ 0-типа при работе в режиме белого сигнала, устройства электронного охлаждения ионных пучков в ускорителях. Использование в таких приборах традиционных систем торможения пучка на основе коллектора полого типа или цилиндра Фарадея ввиду больших размеров последнего и поперечного провисания потенциала на входе в коллектор, приводящего к отражению части электронов первичного пучка, оказывается не всегда приемлемым. При этом возникает необходимость поиска иных путей построения систем глубокого торможения пучка.

В качестве основных проблем, которые приходится решать при построении систем глубокого торможения моноэнергетических пучков, можно выделить следующие две. Первая заключается в предотвращении отражения первичных электронов при низком потенциале на токоприемной поверхности (коллекторе) и определяет максимально возможную глубину торможения пучка или величину потерь по напряжению. Вторая проблема связана с необходимостью подавления вторичной эмиссии и определяет обратный ток на анод пушки или величину токовых потерь в приборе.

Кроме того, КПД приборов коммутационного типа, например электронно-лучевых вентилях [1], зависит не только от степени снижения потерь в приборе, но и от отношения напряжения коммуникации, выдерживаемого прибором дан-

ной конструкции, к отбирающему пучок напряжению. Поскольку отбирающее напряжение приложено между катодом и ускоряющим электродом, а коммутируемое напряжение — к промежутку между ускоряющим электродом и коллектором (высоковольтному зазору прибора), последний промежуток должен быть больше (желательно значительно больше), чем первый. В этом случае необходимо создавать электронно-оптические системы (ЭОС) прибора с существенно различной длиной промежутков ускорения и торможения электронного пучка, или с разномасштабными (неравноплечными) областями ускорения и торможения пучка при сохранении возможности глубокого торможения на коллекторе высокоперевансного пучка.

Радикальным решением первой проблемы является построение систем торможения пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов. Реализация этого принципа в приборах означает, что конструктивно электронно-оптическая система торможения пучка должна быть построена подобно конструкции электронной пушки "против течения". Первая попытка такого подхода была предпринята в работе [2] при конструировании ЭОС лучевого пентода. В данной работе в качестве системы торможения осесимметричного пучка было предложено использовать пушку Пирса, катод которой был заменен коллектором со сферической токоприемной поверхностью, в точности повторяющей поверхность катода.

Вторая проблема, ввиду отказа от использования принципа "черного тела", на котором и осуществляется подавление вторичной эмиссии в цилиндре Фарадея, и невозможности использования в мощных приборах антидинаatronных сеток, может быть решена только путем создания в области торможения пучка минимума потенциала, достаточного для задержки основной части вторичных электронов. Это потребует, несомненно, введения в область торможения специального электрода с низким (желательно катодным) потенциалом. От выбора места расположения и формы этого электрода будет существенно зависеть эффективность функционирования системы торможения прибора и его выходные характеристики.

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ С ГЛУБОКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ ПУЧКА ДЛЯ ПРИБОРОВ КОММУТИРУЮЩЕГО ТИПА

В работе [3] было предложено в качестве исходных вариантов при проектировании реальных ЭОС с глубоким торможением высокоперевансного пучка для электронно-лучевых вентилях и коммутаторов использовать системы с центробежным электростатическим формированием (ЦЭФ) электронного пучка, основанные на идеализированных решениях с траекториями в виде логарифмических спиралей. Очевидными достоинствами этих систем является возможность вынесения ускоряющего электрода из области формируемого электронного потока, выбора произвольной степени неравноплечности ЭОС, глубокого торможения электронов пучка (теоретически вплоть до нулевого). В то же время для ЭОС с ЦЭФ характерны неравномерность токоотбора по поверхности катода, криволинейность траекторий пучка (существенно уменьшающая межэлектродные расстояния) и неравномерность распределения мощности пучка по поверхности коллектора.

Указанных недостатков лишены системы с прямолинейной осью (плоскостью) симметрии пучка [4]. Наборы приближенных аналитических решений для пучков любого типа аналитических решений для пучков любого типа симметрии (осесимметричных, ленточных, трубчатых, дисковых и пр.) с ускорением электронов до максимального потенциала и последующим торможением до нуля, аналогичны рассмотренным в работе [3] для систем с ЦЭФ, можно получить с использованием методики проектирования пушек Пирса "против течения" [5]. При этом возможно построение решений двух типов: равноплечного (частный случай — система, рассмотренная в работе [2]) и неравноплечного. Практический

интерес для создания ЭОС мощных электронно-лучевых приборов представляют неравноплечные решения или системы (рис. 1, а, б). Такие неравноплечные системы с торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов, можно построить на основе использования любых вариантов пушки (включая и вариант с выпуклым катодом, представленный на рис. 1, б) и эквипотенциального участка, согласующего пушку с соответствующей областью торможения. Методика приближенного расчета таких решений для аксиально-симметричных и ленточных пучков приведена в работе [5].

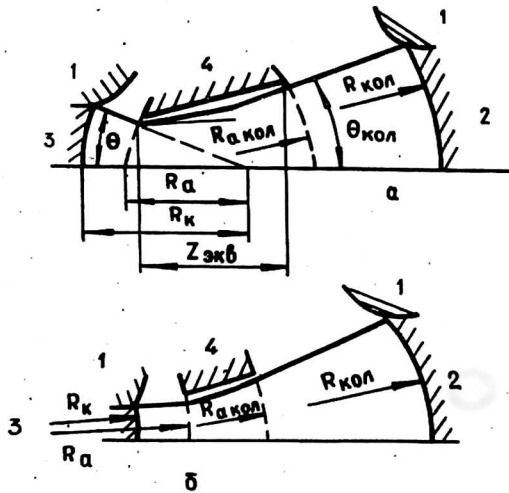


Рис. 1. Варианты построения неравноплечных ЭОС пирсовского типа с торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов пучка:

а — с вогнутым катодом; б — с выпуклым катодом:

1 — фокусирующий электрод; 2 — коллектор; 3 — катод; 4 — анод

В соответствии с разработанной методикой параметры любой неравноплечной системы торможения можно однозначно выразить через параметры пушки и согласующего эквипотенциального промежутка. Например, для осесимметричных ЭОС такая связь выражается следующим соотношением:

$$F(\rho_{a\text{кол}}) = F(\rho_a) + 0,22 \ln(r_{a\text{кол}} / r_a),$$

где $F(\rho_a) = 7,34 \gamma_a^2 / P$;

P — величина пучка, мкА/В^{3/2};

r_a и $r_{a\text{кол}}$ — радиусы пучка в плоскостях анодов пушки и области торможения;

γ_a — угол расходимости граничных траекторий после преломления в анодном отверстии пушки.

Для сравнения различных вариантов неравноплечных систем с торможением пучка предложено использовать параметр, определяющий соотношение протяженности междуэлектродного зазора в области торможения к длине промежутка катод — анод пушки и названный коэффициентом неравноплечности системы:

$$\varkappa = d_{y\text{э-а}} / d_{k\text{-а}} = (R_{\text{кол}} - R_{a\text{кол}}) / (R_k - R_a),$$

для систем с торможением осесимметричных пучков рассчитываемый по соотношению

$$\mathfrak{E} = \frac{r_{\text{акол}}(\rho_{\text{акол}} - 1) n(\rho_{\text{акол}})}{r_{\text{а}} \cdot (\rho_{\text{а}} - 1) n(\rho_{\text{а}})} \frac{F(\rho_{\text{а}})}{F(\rho_{\text{а}}) + 2/9 \ln(r_{\text{акол}} / r_{\text{а}})},$$

где $n(\rho_{\text{а}})$ и $n(\rho_{\text{акол}})$ — коэффициенты преломления траекторий электронов пучка в анодных линзах, соответственно, пушки и области торможения [5].

Достоверность предложенной методики приближенного расчета систем с торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов, и применимость ее при проектировании реальных приборов проверялась как численным моделированием различных вариантов рассчитанных систем, так и путем экспериментального исследования.

Результаты численного анализа одного из вариантов ЭОС с глубоким торможением осесимметричного пучка приведены на рис. 2. За счет использования протяженного эквипотенциального промежутка, согласующего пушку и область торможения, в представленном варианте получен коэффициент неравноплечности, равный 10. Численный анализ данной ЭОС показал, что снижение потенциала на поверхности коллектора вплоть до 2 % от анодного несколько ухудшает ламинарность пучка, но не нарушает его прохождения. Проведенное экспериментальное исследование другого неравноплечного варианта осесимметричной ЭОС (с коэффициентом неравноплечности $\mathfrak{E} = 1,45$), рассчитанного на основе использования плоского катода диаметром 10 мм, позволило также подтвердить применимость разработанной методики приближенного расчета неравноплечных ЭОС с глубоким торможением пучка для проектировании реальных приборов [5]. Задержание вторичных электронов на коллекторе в экспериментальном макете обеспечивалось антидинаatronной сеткой, помещенной в области торможения на место расчетной нулевой эквипотенциали. При 5 %-ном торможении пучка на коллекторе токовые потери на аноде пушки составляли 5 % от тока пучка и могли быть еще снижены за счет специальной фрезеровки поверхности коллектора.

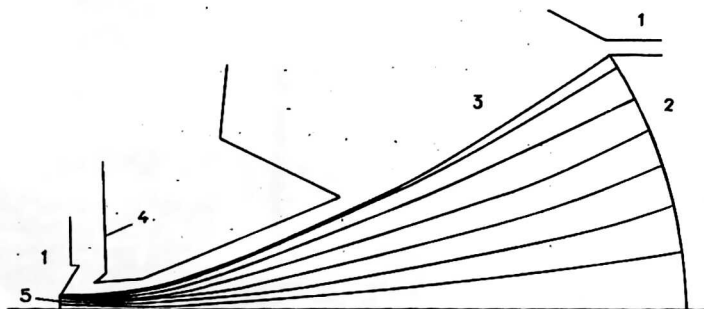


Рис. 2. Результаты численного анализа неравноплечной ЭОС пирсовского типа с торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов, с плоским катодом и протяженным эквипотенциальным промежутком: 1 — фокусирующий электрод; 2 — коллектор; 3 — траектории пучка; 4 — анод; 5 — катод

СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИИ НА КОЛЛЕКТОРЕ МОЩНЫХ ПРИБОРОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ПУЧКА

Разработка мощных электронно-лучевых приборов с глубоким торможением пучка на коллекторе требует иного подхода к решению задачи подавления вторичной эмиссии, нежели использование антидинаatronных сеток, применяемых, как известно, лишь в лампах малой мощности. Как показали исследования, наиболее перспективным методом решения проблемы запираания вторичных электронов на коллекторе в мощных приборах является применение в области торможе-

ния пучка специальных низкопотенциальных электродов, например супрессора [6] или защитного электрода [7, 8]. 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, и антидинаatronным минимумом потенциала осуществлялась на основе применения специализированной программы синтеза [9] и последующего численного моделирования синтезированных систем. Причем в качестве исходных вариантов для численного проектирования использовались приближенные решения, полученные в результате расчета по представленной выше методике. Такой подход к проектированию ЭОС позволяет получать различные варианты систем, существенно отличающиеся такими параметрами, как первеанс пучка, коэффициент неравноплечности, степень торможения пучка на коллекторе, относительная глубина антидинаatronного минимума потенциала.

Типичные результаты численного проектирования неравноплечных ЭОС с торможением ленточного пучка и низковольтным электродом для задержки вторичной эмиссии с коллектора представлены на рис. 3. В соответствии с приведенной выше методикой построения идеализированных неравноплечных ЭОС с торможением для увеличения высоковольтного зазора в синтезированных ЭОС при выбранных параметрах пучка в пушке требуется удлинять протяженность эквипотенциального промежутка (что следует из сравнения рис. 3, а, б). Углубление минимума потенциала для улучшения задержки вторичных электронов на коллекторе и снижения тем самым токовых потерь в приборе можно получить за счет увеличения зазора между низковольтным электродом и коллектором (см. рис. 3, б, в). При этом необходимо или повышать коллекторный потенциал (и тем самым идти на увеличение потерь по напряжению в приборе) или снижать первеанс пучка.

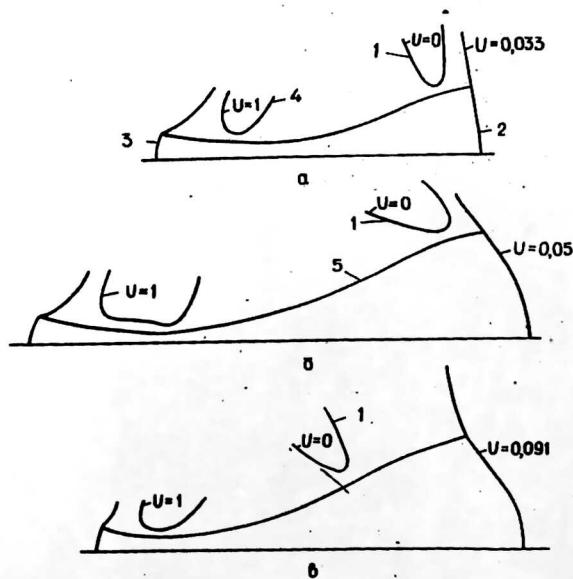


Рис. 3. Результаты численного проектирования вариантов неравноплечных ЭОС с антидинаatronным электродом в области торможения:

а, б — плоскосимметричных ЭОС с супрессором; в — плоскосимметричной ЭОС с промежуточным электродом: 1 — антидинаatronный электрод (супрессор); 2 — коллектор; 3 — катод; 4 — анод; 5 — граница пучка

Еще более существенный эффект подавления вторичной эмиссии с коллектора, как показали не только численные расчеты, но и последующее экспериментальное исследование разработанных систем, дает введение вместо приколлекторного электрода в область торможения пучка защитного электрода, помещаемого непосредственно за анодом пушки (рис. 4, а). Очевидно, что защитный электрод наиболее сильно снижает потенциал в области торможения, что приводит к возрастанию влияния объемного заряда электронного пучка в промежутке анод — коллектор и эквивалентно повышению первеанса пучка в области торможения. При этом требуется, как и в рассмотренном выше варианте ЭОС, или уменьшать зазор между анодом и коллектором, или увеличить потенциал на коллекторе, или же, наконец, снижать первеанс пучка, вводимого в область торможения.

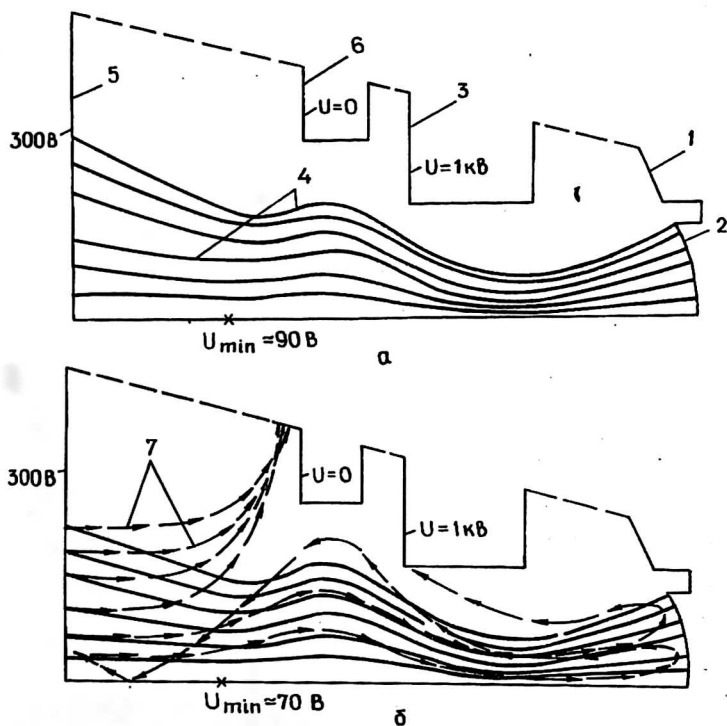


Рис. 4. Результаты численного моделирования неравноплечной ЭОС пирсовского типа с защитным электродом:

а — с учетом электронов первичного пучка; б — с учетом первичного пучка и упругоотраженных электронов с коллектора;

1 — фокусирующий электрод; 2 — катод; 3 — анод; 4 — траектории первичного пучка; 5 — коллектор; 6 — защитный электрод; 7 — траектории упругоотраженных электронов

Результаты численного моделирования ЭОС с защитным электродом позволили также наглядно подтвердить эффективность подавления вторичных и отраженных от коллектора электронов в системах с защитным электродом, показанную ранее при экспериментальном исследовании трансаксиальных ЭОС [7], и систем с другим типом симметрии пучка [8]. На рис. 4,б представлены результаты численного анализа ЭОС с защитным электродом в режиме 30%-ного торможения пучка на коллекторе с учетом влияния упругоотраженных от коллектора электронов. Коэффициент упругого отражения был выбран равным $\gamma = 0,02$, энергия вылета упругоотраженных электронов соответствовала потенциалу коллектора, направление начальных скоростей принималось ортогональным к поверхности коллектора. Анализ показал, что большинство упругоотраженных

электронов задерживается полем защитного электрода. Процент запираения на коллекторе более медленных, неупруго рассеянных электронов, естественно, значительно выше, чем в рассмотренном случае. Однако, результат анализа показал также, что учет влияния даже столь незначительной доли вторичной эмиссии дает существенное (примерно на 27 %) снижение глубины минимума потенциала; отметим, что по порядку величины это соответствует оценкам влияния вторичной эмиссии в плоском диоде [10]. Следовательно, численный расчет предельных режимов разработанных ЭОС требует обязательного учета вторичной эмиссии с коллектора.

И, наконец, характерной особенностью всех полученных в результате численного проектирования неравноплечных ЭОС является наличие в области торможения низкопотенциального электрода (преимущественно с потенциалом, равным катодному), формирующего в пучке минимум потенциала открытого типа, обеспечивающего также отток ионов, что препятствует их накоплению в системе и является несомненным достоинством разработанных ЭОС перед системами с коллектором типа цилиндра Фарадея.

Заключение

Перспективным направлением для улучшения параметров современных мощных электронно-лучевых приборов и устройств с рекуперацией энергии моноэнергетического или слабозмущенного электронного пучка является применение ЭОС с торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов. Создание таких ЭОС возможно на основе разработанной методики расчета идеализированных решений "пирсовского" типа, которые могут служить исходными вариантами для разработки реальных конструкций ЭОС приборов, что подтверждают результаты численного проектирования и экспериментальных исследований.

Проведенное всестороннее исследование различных вариантов ЭОС нового типа с глубоким торможением электронных пучков на поверхность, ортогональную траекториям электронов, доказало устойчивость сформированных в таких ЭОС электронных потоков к изменениям геометрии электродов и возможность проектирования на основе предложенной методики реальных конструкций приборов с включением в предлагаемые системы эффективных антидинаatronных электродов, обеспечивающих также "сток" ионов. Численный анализ предельных режимов работы представленных ЭОС требует учета влияния вторичной эмиссии с коллектора.

Неравноплечные ЭОС с глубоким торможением пучков с прямолинейной осью (плоскостью) симметрии и защитным электродом используются в настоящее время для создания конструкций современных высоковольтных электронно-лучевых приборов коммутационного типа в широком диапазоне параметров, отличающихся малыми габаритами при большой коммутируемой мощности и высоком КПД.

Литература

1. Будкер Г. И., Переводчиков В. И.: А. с. 367482, БИ, 1973. № 8. МКИ Н 01 21/10.
2. Dunn D., Borgi R., Morwood R.// *Microwaves Proc. Of the 4-th Intern. Congress on Microwaves Tubes*, Scheweningen (Holland), 1962. P. 526.
3. Чернов З. С., Бернашевский Г. А. *Задачи физической электроники*. — М.: Наука, 1982. С. 175—178.
4. Акимов П. И., Переводчиков В. И.//III Укр. Респ. Конф. По электронной оптике и ее применению, 1974. Ч. 1. С. 4.
5. Акимов П. И., Переводчиков В. И. *Задачи физической электроники* — М.: Наука, 1982. С. 144—152.

6. Гинзбург В. Е., Горбачева Т. Н.// Электронная техника. Сер. 4. Электрорадиодетали и газоразрядные приборы, 1974. Вып. 1. С. 3—8.
7. Акимов П. И., Нагучев О. Ю., Стученков В. М.//III Укр. Респ. Конф. По электронной оптике и ее применению, 1974. Ч. 1. С. 7.
8. Акимов П. И., Переводчиков В. И., Шапенко В. Н.// РЭ. 1997. Т. 32. № 3. С. 361.
9. Акимов П. И., Верстакова Е. А., Данилов В. А., Цхай А. Б. Импульсные электромех. и полупроводн. преобразователи энергии. — Куйбышев, 1978. С. 135.
10. Акимов П. И., Данилов В. А., Цхай А. Б.: Всесоюз. сем. по методам решения задач электронной оптики, 1978. Ч. 1. С. 11.

THE PROBLEMS OF CREATION THE SYSTEMS OF DEEP DECELERATION OF INTENSIVE ELECTRON BEAMS

P. I. Akimov

The All-Russia Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The ways of systems construction of intensive few disturbance or mono energetic electron beams deep deceleration for powerful electron beam devices and equipments are discussed in this paper, also the problems, appeared during the realisation of such systems. We consider the main principles of construction and method of system calculation with deep deceleration for electron devices of commutative type. We propose the means of secondary emission retardation from collector.