

УДК 537.533

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРНЫХ СИСТЕМ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВЫХ ПРИБОРОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

П. И. Акимов

Всероссийский электротехнический институт, Москва, Россия.

С использованием приближенных аналитических решений и методов численного проектирования проведена разработка систем торможения интенсивного пучка на поверхность коллектора "открытого типа". Приведены результаты их экспериментального исследования и характеристики разработанного на их основе мощного электронно-лучевого вентиля. Показаны пути их дальнейшей оптимизации для создания новых конструкций современных электронно-лучевых вентилях и коммутаторов.

Исследования различных авторов [1—4] подтверждают, что применяемые для рекуперации энергии электронных пучков в приборах СВЧ типа О коллекторы полого типа (цилиндры Фарадея) наряду с хорошими характеристиками по подавлению вторичной эмиссии обладают рядом существенных недостатков: большие размеры коллектора; провисание потенциала во входном отверстии, препятствующее реализации режимов глубокого торможения пучка с высоким первеансом; наличие в коллекторной полости потенциальной ямы, являющейся ловушкой для ионов и причиной расхождения импульсных и стационарных характеристик прибора и пр. Попытки создания коллекторных систем с торможением пучка, основанных на иных принципах, предпринимались и другими авторами [5—7]. Тем не менее, систематические исследования по новым методам торможения интенсивных высокопервеансных пучков следует связать с разработкой нового класса электронных приборов — электронно-лучевых вентилях [8], поскольку и области применения и особенности использования этих приборов потребовали разработки принципиально новых электронно-оптических систем (ЭОС), удовлетворяющих комплексу особых требований, отличных от предъявляемых к традиционным приборам.

Важнейшим из этих требований является достижение высокого коэффициента полезного действия, определяемого соотношением коммутируемой мощности и мощности потерь в приборе.

$$\eta = 1 - U_{уэ} / U_{ком} [I_{уэ} / I_{кат} + U_{кол} / U_{уэ}]$$

где $U_{уэ}$, $I_{уэ}$ — напряжение и ток на ускоряющем электроде, соответственно;
 $U_{ком}$ — напряжение коммутации;
 $I_{кат}$ — ток пучка (катодный);
 $U_{кол}$ — напряжение на коллекторе прибора.

Отсюда следует, что обработка приборов типа ЭЛВ требует создания ЭОС не только с минимальными потерями мощности пучка при максимальном первеансе последнего, но и с существенно различной длиной промежутков ускорения и торможения, иначе говоря разномасштабных или неравноплечных.

Одновременно реализовать в ЭОС максимальный первеанс и максимальную длину высоковольтного зазора при глубоком торможении электронного пучка невозможно. Эти требования по своей природе противоречивы. Поэтому создание ЭОС ЭЛВ — типично оптимизационная задача, для решения которой потребовалось разработать приближенную методику расчета идеализированных неравноплечных систем с глубоким торможением пирсовского типа [9] и систему численного проектирования ЭОС, включающую специализированные программы синтеза [10, 11] и численного моделирования разрабатываемых систем [12, 13].

РАЗРАБОТКА ЭОС ЭЛВ НЕРАВНОПЛЕЧНОГО ТИПА С ТОРМОЖЕНИЕМ ПУЧКА НА ПОВЕРХНОСТЬ

Методика приближенного расчета идеализированных неравноплечных систем, в которых область торможения пучка построена по принципу "обращенной пушки Пирса", подробно изложена в работе [9]. Она позволяет провести расчет всех характерных размеров неравноплечной ЭОС с торможением пучка на нулевую эквипотенциаль. Полученное решение является исходным вариантом для последующего проектирования ЭОС конкретного прибора. Для синтеза ЭОС прибора с требуемыми параметрами в качестве исходной информации задается распределение потенциала на оси (плоскости) симметрии пучка с фиксированными значениями в характерных точках, определяющих первеанс, форму синтезируемого пучка и положение внешних электродов на каждом из участков ЭОС (в пушке, согласующем эквипотенциальном промежутке, в области торможения пучка). При этом протяженность участка ускорения, эквипотенциального промежутка и области торможения выбираются в соответствии с результатами приближенного расчета неравноплечных систем с ленточными пучками. Для подавления вторичной эмиссии с коллектора в области торможения синтезной ЭОС формируется минимум потенциала максимально возможной глубины, не приводящей еще к образованию виртуального катода; от задания на кривой распределения осевого потенциала координаты точки приколлекторного минимума зависит и положение внешнего антидинаatronного электрода.

Программа синтеза неравноплечных ЭОС с глубоким торможением пучка на поверхность коллектора, ортогональную траекториям падающего пучка, позволяет рассчитывать траектории и распределение потенциала внутри пучка и находить форму фокусирующих электродов, обеспечивая формирование синтезированного потока.

Модификация синтезированных вариантов неравноплечных ЭОС проводится методом численного анализа [12, 13], что позволяет придать электродам технологичную форму, необходимую для разрабатываемой конструкции прибора, добиться увеличения высоковольтного зазора ЭОС, уменьшения напряженностей поля на электродах (по сравнению с синтезными величинами), и даже снижения потенциала коллектора (за счет некоторого нарушения ламинарности пучка, не приводящей к снижению токопрохождения на коллектор).

Примеры полученных в результате проведенного проектирования неравноплечных плоскосимметричных ЭОС представлены на рис. 1. В ЭОС (рис. 1, а) при удельном первеансе ленточного пучка $P = 0,6 \text{ мкА}/(\text{В}^{3/2} \cdot \text{см})$ и ширине катода 6 мм высоковольтный зазор между ускоряющим и антидинаatronным приколлекторным электродами равен 26 мм. Глубина минимума потенциала в плоскости симметрии системы, равная 50 % от потенциала коллектора, несомненно позволяет задержать большую часть вторичных и отраженных электронов. За счет увеличения зазора между антидинаatronным электродом и коллектором можно добиться улучшения условий запираия вторичной эмиссии на коллекторе, что достигается за счет увеличения потерь на коллекторе (рис. 1, б). В этом случае в "приосевой" области минимум потенциала задерживает более 70 % энергетического спектра вторичных и отраженных электронов. Наиболее эффективное подавление вторичных и отраженных электронов осуществляется в системе (рис. 1, в) с расположенным непосредственно за анодом пушки защитным электродом [14], обеспечивающей запираие на коллекторе (в том числе и в "приосевой" области более 90 % энергетического спектра вторичных электронов). Плата за столь высокую эффективность данной системы — необходимость повышения потенциала коллектора до 27 % от ускоряющего пучок потенциала.

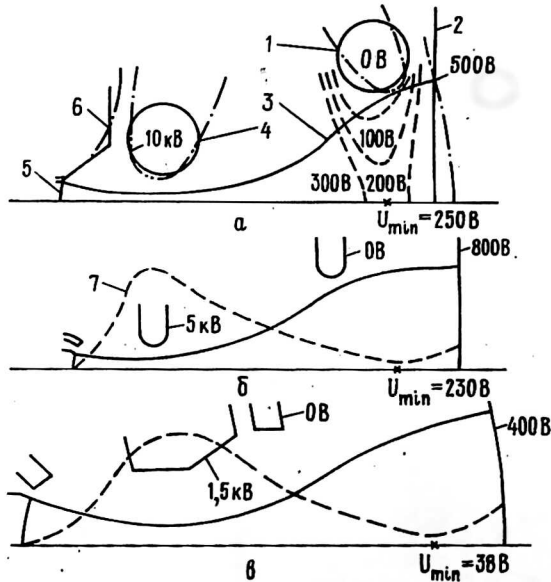


Рис. 1. Варианты неравноплечных ЭОС пирсовского типа с ленточными пучками: а — с супрессором (штрихпунктирными линиями представлена форма электродов синтезированного варианта ЭОС); б — с промежуточными электродом; в — с защитным электродом (пунктирные линии — эквипотенциали и распределения потенциала в плоскости симметрии ЭОС):

1 — антидинаatronный электрод; 2 — коллектор; 3 — граничная траектория; 4 — анод; 5 — катод; 6 — фокусирующий электрод; 7 — потенциал "на оси" пучка

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОПЛЕЧНЫХ ЭОС

Предложенная методика позволяет разработать новый тип неравноплечных систем с торможением пучка на поверхность коллектора "открытого типа" и низкочастотным антидинаatronным электродом в области торможения пучка, формирующим перед коллектором минимум потенциала, запирающий вторичные электроны на коллекторе. Причем от положения этого электрода и его формы, как показали расчетные данные и результаты последующих экспериментальных исследований, существенно зависят свойства разрабатываемых систем.

Экспериментальные исследования проводились для различных конструктивных вариантов неравноплечных плоскосимметричных систем с торможением ленточного пучка, выбираемых из решений, полученных в результате численного проектирования. Разборный экспериментальный макет размещался в вакуумной камере, все измерения проводились в стационарном режиме при уровне вакуума в системе порядка $1 \cdot 10^6$ торр. Наличие мощных регулируемых источников питания и применение принудительного охлаждения электродов макета позволяли проводить исследования в широком диапазоне изменения токов и напряжений. Катодный узел макета состоял из ленточного оксидного катода косвенного накала длиной 200 мм и шириной 6 мм, помещаемого в полый прикатодный фокусирующий электрод, выполненный из трубки диаметром 20 мм и толщиной 2 мм с отверстием в виде продольной щели длиной 200 мм и шириной 6 мм для прохождения электронного пучка.

Приведенные на рис. 2 тормозные характеристики построены по результатам экспериментального исследования, соответственно, трех вариантов неравноплечных ЭОС с ленточными пучками (см. рис. 1). Анализируя полученные характеристики можно отметить, что экспериментальные исследования в целом подтвердили основные предположения по параметрам данных систем, сделанные по результатам численного моделирования. Вариант ЭОС, приведенный на рис. 1, а, условно названный системой с супрессором, при возможности работы в режимах наиболее глубокого торможения пучка на коллекторе и минимальных суммарных потерях ($\Delta U + \Delta I = 12-15\%$, при $\Delta U = 3-10\%$, где ΔU — отношение потенциалов коллектора и анода пушки, а ΔI — отношение величин анодного и катодного тока), характеризуется наибольшей величиной токовых потерь (кривая 1, рис. 2). Результаты исследования системы с промежуточным антидинаatronным электродом (см. рис. 1, б) соответствуют высказанному ранее предположению об улучшении условий задержки вторичной эмиссии на коллекторе при смещении низкопотенциального электрода к аноду. Наибольшее подавление вторичной эмиссии обеспечивается, как и следовало ожидать, в системе с защитным электродом (кривая 3, рис. 2). Несмотря на существенное увеличение суммарных потерь мощности пучка в этой системе, по сравнению с двумя предыдущими, сложности охлаждения высокопотенциальных анодных электродов и определенные конструктивные соображения позволили выбрать конструкцию неравноплечной ЭОС с защитным электродом для создания прибора с параметрами: коммутлируемое напряжение 40 кВ, ток в постоянном режиме 4 А [15]. Семейство вольт-амперных характеристик ЭЛВ 4/40, разработанного на основе многолучевой ЭОС, схематически представленной на рис. 3, а, приведено на рис. 3, б.

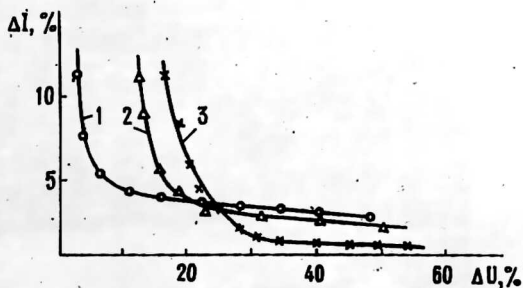


Рис. 2. Тормозные характеристики, полученные при экспериментальном исследовании вариантов неравноплечных ЭОС с ленточными пучками: 1 — с супрессором; 2 — с промежуточным электродом; 3 — с защитным электродом

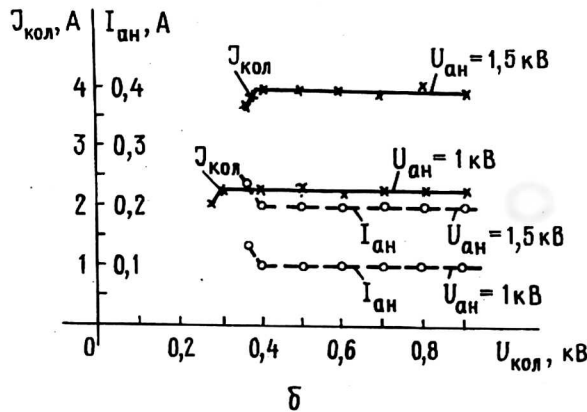
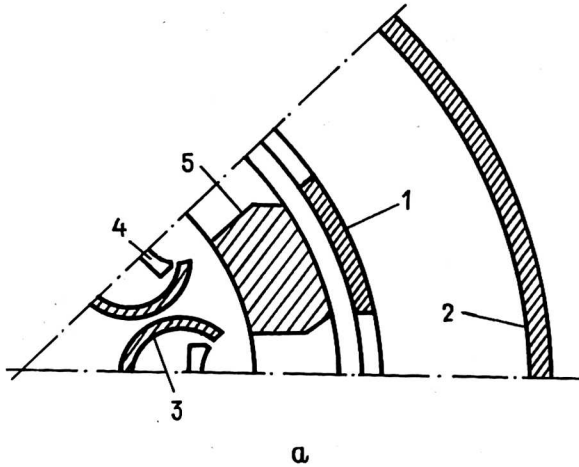


Рис. 3. Схематический вид ЭОС многолучевого ЭЛВ 4/40 (а) и вольт-амперные характеристики (б), полученные при испытаниях ЭЛВ 4/40 (сплошные линии — ток коллектора, штриховые — ток анода пучки): 1 — защитный электрод; 2 — коллектор; 3 — фокусирующий электрод; 4 — катод; 5 — анод

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕРАВНОПЛЕЧНЫХ ЭОС ПИРСОВСКОГО ТИПА ДЛЯ ЭЛВ

Дальнейшая работа была связана с оптимизацией выбранного варианта ЭОС с защитным электродом с целью улучшения параметров разработанной конструкции прибора. Очевидный недостаток представленного на рис. 1, в варианте ЭОС по сравнению с исходной идеализированной неравноплечной системой пирсовского типа — излишне сильное влияние нулевого защитного электрода на распределение потенциала в области торможения. Близость защитного электрода к ускоряющему, позволяя эффективно подавлять вторичную эмиссию в режиме торможения пучка на коллекторе, в то же время существенно снижает потенциал в области прохождения электронов пучка, что эквивалентно уменьшению первоанса системы торможения, и препятствует реализации в разработанном приборе режимов глубокого торможения.

Устранить данные недостатки ЭОС с защитным электродом можно двумя способами: во-первых, ослабляя влияние защитного электрода на пучок за счет удаления этого электрода путем увеличения ширины щели в последнем; во-вторых, усилением влияния на распределение потенциала и пучок в области торможения ускоряющего электрода. Это можно реализовать также двойным образом. Приближение ускоряющего электрода к границе пучка за счет сужения ширины щели в ускоряющем электроде, очевидно, повысит потенциал в пучке и величину пер-

веанса как пушки, так и области торможения. И, наконец, существенно повысить первеанс области торможения можно путем уменьшения расстояния между ускоряющим электродом и коллектором, вытягивая ускоряющий электрод в сторону коллектора. Такой подход к проектированию ЭОС приведет к экранировке поля защитного электрода ускоряющим и тем самым к возможности дополнительного повышения эффективности торможения пучка в разрабатываемом приборе.

На рис. 4, а, б представлены варианты, полученные в результате оптимизации неравноплечной ЭОС с защитным электродом. За счет соответствующей модификации электродов системы удалось добиться устойчивого прохождения пучка на коллектор при более низких потенциалах коллектора по сравнению с исходной ЭОС ЭЛВ 4/40. При этом в варианте, представленном на рис. 4 б, утолщение ускоряющего электрода со стороны коллектора приводит к повышению потенциала в пучке в области торможения (увеличению "первеанса" области торможения), позволяет еще более снизить предельно допустимый потенциал коллектора, что должно привести к снижению потерь в приборе и повышению его КПД. Дальнейшее утолщение ускоряющего электрода с стороны коллектора или же уменьшение расстояний между ними при неизменном положении и размерах защитного электрода приводит, как показали расчеты, к значительному уменьшению глубины минимума потенциала для "центральных" траекторий пучка вплоть до полного исчезновения минимума, что недопустимо из-за вероятности резкого нарастания токовых потерь за счет вторичной эмиссии с коллектора.

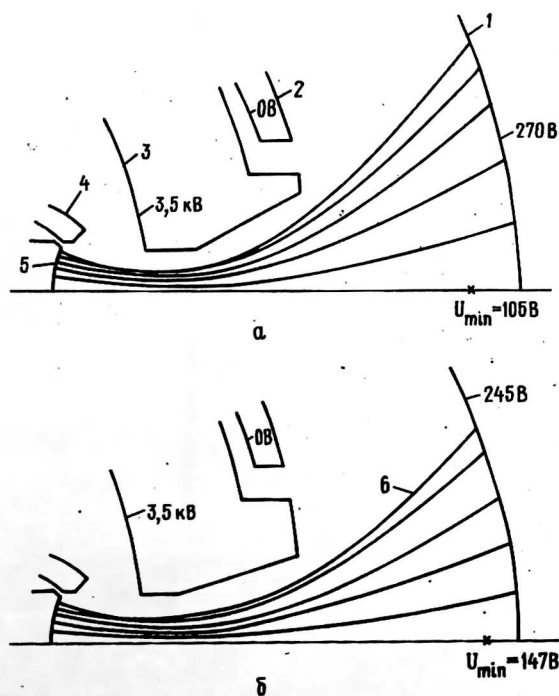


Рис. 4. Результаты оптимизации варианта неравноплечной ЭОС с защитным электродом и ленточным пучком:

- 1 — коллектор; 2 — защитный электрод; 3 — анод; 4 — фокусирующий электрод;
- 5 — катод; 6 — траектории пучка

При различии параметров ЭОС, представленных на рис. 4 и рис. 1, в (в геометрии электродов, первеансах пушки, форме траекторий пучка, величине аберраций и пр.), их можно сравнивать по одному общему параметру — удельному первеансу пучка по коллектору (отношению удельного тока пучка с 1 см длины ленточного катода к величине потенциала коллектора в степени 3/2). Значения удельно-го первеанса пучка по коллектору для всех трех ЭОС с защитным электродом:

Номер варианта — $P_{1\text{кол}} (A/V^{3/2})$: 1 — $1,6 \cdot 10^{-3}$; 2 — $1,13 \cdot 10^{-2}$; 3 — $1,27 \cdot 10^{-2}$,
 где 1 — ЭОС (рис. 1, в); 2 — ЭОС (рис. 4, а); 3 — ЭОС (рис. 4, б).

$P_{1\text{кол}} (A/V^{3/2}) = I_{1\text{кол}} / U_{\text{кол}}^{3/2}$, где $I_{1\text{кол}}$ — ток пучка на 1 см ширины коллектора.

Результаты проведенной оптимизации и модифицированные варианты коллекторных систем с защитным электродом используются в настоящее время для разработки нового образца ЭЛВ.

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ ПИРСОВСКОГО ТИПА

Предложенные и экспериментально исследованные неравноплечные ЭОС с коллекторными системами типа обращенной пушки Пирса позволяют создать новый тип электронно-лучевых коммутирующих приборов, отличающихся при существенно меньших габаритах по сравнению с любыми известными в настоящее время конструкциями чрезвычайно высокими удельными параметрами, такими как коммутируемые прибором мощности, величины тока, напряжение коммутации, к. п. д. Однако использование характерных особенностей предложенных неравноплечных ЭОС с антидинаatronным (защитным) электродом и глубоким торможением пучка на коллектор "открытого" типа позволяет проводить дальнейшее усовершенствование конструкции прибора. Перспективной с точки зрения значительного улучшения параметров приборов типа ЭЛВ при одновременном существенном упрощении конструкции прибора представляется разработка "триодного" варианта ЭЛВ с ЭОС пирсовского типа, схематически представленной на рис. 5, а, где роль защитного электрода выполняет непосредственно катодные узлы прибора. Для создания конструкций электронно-лучевых коммутаторов в определенном диапазоне параметров не менее перспективным может оказаться сочетание подобного же принципа компоновки с неравноплечной ЭОС с ЦЭФ (см. рис. 5, б), использование которой для ЭЛВ впервые предложено авторами работы [16]. Преимущества этих конструкций по сравнению с традиционными (тетродными, к которым относится и ЭЛВ 4/40) как в более полном использовании объема прибора, так и в отсутствии отдельно выполненного защитного электрода, что, помимо упрощения конструкции, дает дополнительное уменьшение габаритов. Такое направление разработок совместно с применением в приборе для охлаждения новых высокоэффективных теплоносителей в режиме кипения будут способствовать повышению конкурентоспособности разрабатываемых приборов по сравнению с полупроводниковыми.

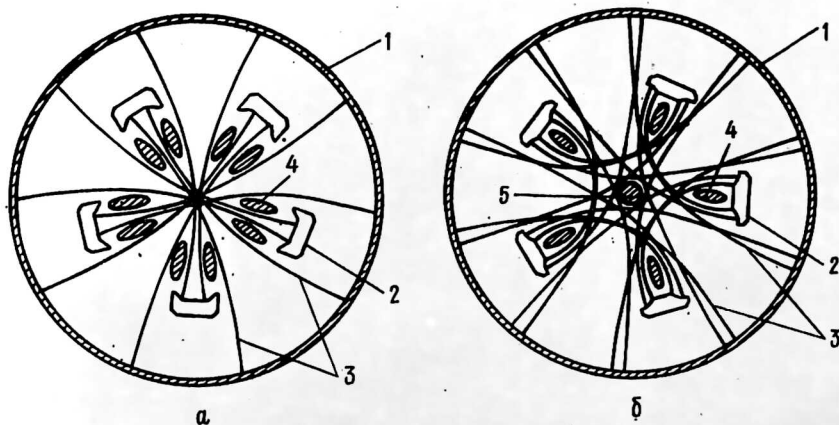


Рис. 5. Конструктивные решения "триодного" варианта ЭЛВ: а — с неравноплечной ЭОС пирсовского типа; б — с равноплечной ЭОС с центробежно-электростатическим формированием пучка:

1 — коллектор; 2 — катодный узел; 3 — траектории пучка; 4 — анод; 5 — отражательный нулевой электрод

З а к л ю ч е н и е

Требования к современным электронно-лучевым коммутирующим приборам типа ЭЛВ вызывают необходимость разработки нового типа ЭОС — неравноплечных систем с глубоким торможением пучка на поверхность, ортогональную траекториям электронов. Разработка таких ЭОС проведена на основе методики расчета идеализированных решений и численного проектирования с использованием специализированных программ синтеза и анализа. Разработаны системы с технологичными электродами и антидинаotronным минимумом потенциала в области торможения, создающим эффективный потенциальный барьер для запирающей вторичной эмиссии на коллекторе.

Экспериментальное исследование вариантов неравноплечных ЭОС с ленточными пучками подтвердило основные результаты, полученные расчетным путем. Дальнейшая разработка конструкции многолучевого прибора на основе неравноплечной плоскосимметричной ЭОС с защитным электродом и полученные экспериментально характеристики ЭЛВ 4/40 подтвердили все заложенные при проектировании прибора параметры.

Проведенная оптимизация неравноплечной ЭОС с защитным электродом позволила существенно увеличить эффективность торможения пучка на коллектор "открытого типа", что в свою очередь позволило приступить к созданию модифицированного варианта ЭЛВ. Намечены также пути дальнейшего совершенствования параметров приборов с коллекторными системами "открытого типа".

Л и т е р а т у р а

1. Геккер И. Р. //Изв. вузов. Сер. Радиотехника. 1960. Т. 3. N 4. С. 441.
2. Wolkstein H. J. //RCA Review, 1958. V. 19. P. 259.
3. Sterzer F. //IRE Trans., 1958. V. ED-5. N 4. P. 300.
4. Тараненко В. П., Дереновский М. В. //Изв. вузов. Сер. Радиотехника, 1961. Т. 4. № 6. С. 719.
5. Dunn D., Borgi R., Morwood R. //Microwaves Proc. of the 4-th Intern. Congress on Microwaves Tubes, Scheweningen (Holland), 1962. P. 526.
6. Гинзбург В. Е., Лебединский С. В. //Электронная техн. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1972. Вып. 2. С. 32.
7. Мешков И. Н., Салимов В. Н., Файнштейн В. Г. //ЖТФ, 1973. Т. 13. Вып. 8.
8. Будкер Г. И., Переводчиков В. И. //А. с. 367482 СССР, БИ, 1973. № 8. МКИ Н01 21/10.
9. Акимов П. И., Переводчиков В. И. Задачи физической электроники. — М.: Наука, 1982. С. 144—152.
10. Акимов П. И., Верстакова Е. А., Данилов В. А., Цхай А. Б. Импульсные электро-мех. и полупроводн. преобразователи энергии. — Куйбышев, 1978. С. 135.
11. Акимов П. И., Данилов В. А., Осипова Г. П., Цхай А. Б. Задачи физической электроники. — М.: Наука, 1982. С. 153—160.
12. Акимов П. И., Данилов В. А., Покрас А. Н., Цхай А. Б. //Там же. С. 164—168.
13. Акимов П. И., Панибрацкий В. А., Свешников В. М.: III Межд. конф. по электронно-лучевым технологиям. — Варна, 1991. С. 48.
14. Акимов П. И., Нагучев О. Ю., Шеметов М. П. //Новые мощные высоковольтные коммутирующие приборы — электроннолучевые вентили: Обзорн. информация. — М., Информэлектро. 1973. С. 14—19.
15. Акимов П. И., Переводчиков В. И., Шапенко В. Н. //РЭ. 1997. Т. 42. № 3. С. 361.
16. Чернов З. С., Бернашевский Г. А. //Задачи физической электроники. — М.: Наука, 1982. С. 175—178.

Автор благодарит В. И. Переводчикову за полезные замечания и интерес к работе.

**THE ELABORATION AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE NEW
TYPE COLLECTOR SYSTEMS FOR THE ELECTRON BEAM DEVICES
WITH THE ELECTRON ENERGY RECUPERATION**

P. I. Akimov

The All-Russia Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

The elaboration of the intensive beams deceleration systems on the opened type collector surface was carried out with the help of the approximate analytic solutions and numerical projecting methods. The results of such systems experimental researches and the characteristics of the powerful electron beam switch are quoted. The ways of the following optimization of such systems for new modern electron beam switch and commutator designs are demonstrated.