

Валерий Иванович Мальчук родился в 1941 г., окончил в 1966 г. Московский автомобильно-дорожный институт (МАДИ). Канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник Государственного технического университета "Московский автомобильно-дорожный институт" (ГТУ "МАДИ"). Автор более 60 научных работ в области топливopодачи дизелей.

V.I. Malchuk (b. 1941) graduated from the Moscow Institute for Vehicles and Roads (MADI) in 1966. Ph. D. (Eng.), leading researcher of the State Technical University "Moscow Institute for Vehicles and Roads" (GTU "MADI"). Author of over 60 publications in the field of fuel supply of diesel engines.



Владимир Николаевич Семенов родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Московский автомобильно-дорожный институт (МАДИ). Канд. техн. наук, ведущий инженер бюро топливной аппаратуры дизелей завода им. Лихачева (ЗиЛ). Автор более 10 научных работ в области рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания.

V.N. Semyonov (b. 1954) graduated from the Moscow Institute for Vehicles and Roads (MADI) in 1976. Ph. D. (Eng.), leading engineer of the bureau for diesel fuel equipment of the Likhachov Factory (ZIL). Author of over 10 publications in the field of operation process of internal combustion engines.

УДК 621.431.37:621.59

В. В. О н у ф р и е в, С. Д. Г р и ш и н,
В. В. С и н я в с к и й

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА — ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ СОГЛАСОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭМИССИОННОГО РЕАКТОРА И ЭЛЕКТРОРАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований высокотемпературных плазменных вентиляей на основе несамостоятельного дугового разряда в парах цезия (бария) для управления током в электрических цепях. Показаны электрические и теплофизические параметры, массоэнергетические характеристики вентиляей. Приведены расчетные зависимости для проектирования вентиляей.

Эксплуатационные характеристики и ресурс космических энергетических установок (ЭУ) на базе термоэмиссионных реакторов-преобразователей (ТРП) во многом зависят от параметров систем согласования напряжения и тока между потребителями и источником

энергии. Функционирование ТРП на борту космического аппарата (КА) имеет ряд особенностей, определяющих условия построения всей архитектуры бортовых ЭУ [1]: высокую температуру внеэлектронных узлов и элементов энергоустановки; сильное ионизирующее излучение (интегральный поток быстрых нейтронов (10^{18} нейтр./см² до защиты и 10^{12} нейтр./см² за защитой)); значительную удаленность источника энергии от потребителя; невесомость, глубокий вакуум окружающей среды; потоки высокоэнергетичных частиц (до 60...70 кэВ на высотах более 800 км).

Указанные особенности работы ТРП налагают довольно жесткие требования на выбор системы согласования тока того или иного типа, определяя их массогабаритные показатели и выходные характеристики. При коммутации электрической мощности $N_{эл} = 10^4 \dots 10^6$ Вт (область предпочтительного применения ТРП [2]), уровне КПД системы согласования тока ЭУ и потребителей 95...99% величина потерь мощности $N_{пот}$ составляет 5...200 кВт. Исходя из этого, можно оценить необходимую величину площади холодильников-излучателей (ХИ) $S_{хи}$ преобразователя тока по известным зависимостям [3]. Расчеты показывают, что для приемлемых массогабаритных показателей КА величина минимальной рабочей температуры преобразователя тока составляет 600...700 К, что соответствует области ограниченных возможностей полупроводников, перспективные конструкции которых обеспечивают токи до 100 А при падении напряжения $U_{пр} = 1,8$ В и обратные напряжения $U_{пр.об} = 150 \dots 400$ В [4, 5]. Полупроводниковые элементы чувствительны к воздействию ионизирующих излучений, перегрузок, требуют постановки защиты, применения контролируемой атмосферы. Система электропитания мощной электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) может строиться на основе высокотемпературных плазменных управляемых и неуправляемых клапанов, обладающих, по сравнению с полупроводниковыми, стойкостью к воздействию ионизирующих излучений и пиковых перегрузок, высокой рабочей температурой. Основными проблемами создания таких клапанов являются [6–8]: реализация низковольтного дугового разряда в проводящем состоянии клапана, обеспечивающем потери напряжения 1,5...2,5 В; управление поджигом и гашением разряда в термоэмиссионном клапане с паровым наполнением и оптимизация энергетических затрат на управление; обеспечение электрической прочности межэлектродного зазора клапанов (МЭЗ) по отношению к обратному дуговому пробоев в непроводящем состоянии.

Для обеспечения конкурентоспособности, по сравнению с традиционными схемами на основе полупроводников, система электропитания

мощных ЭРДУ с двигателями с анодным слоем (ДАС) и стационарными плазменными двигателями (СПД) должна отвечать следующим требованиям: рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$ не менее 1500...2000 В; КПД преобразователя 85...90 %. Разработка высокотемпературных плазменных вентилях для систем электропитания мощных ЭРДУ является актуальной также потому, что позволяет все ее узлы: ЭУ, систему согласования–преобразования тока и электроракетный двигатель (ЭРД) разместить в едином конструктивном модуле вследствие близких температурных режимов.

В настоящей работе приведены основные результаты теоретических, проектно-конструкторских и экспериментальных работ, выполненных на кафедре “Плазменные энергетические и двигательные установки” МГТУ имени Н.Э. Баумана по техническим заданиям и с участием специалистов РКК “Энергия” имени С.П. Королева.

Система электропитания ЭРДУ на высокотемпературных плазменных вентилях. Система электропитания маршевой ЭРДУ мощностью свыше 100 кВт строится по схеме конверторного преобразователя тока. Собственно сам высокотемпературный преобразователь напряжения и тока (постоянного низковольтного $U_{\text{т.п.л}} < 100 \dots 120$ В в постоянное высоковольтное $U_{\text{р}} = 1000 \dots 2000$ В) представляет собой комбинацию следующих элементов (рис. 1): плазменного полностью управляемого вентиля, высокотемпературного трансформатора, плазменного высоковольтного диода. Плазменный полностью управляемый вентиль служит для модулирования постоянного тока в импульсный периодический, что достигается подачей управляющего импульса на сетку вентиля и переводом вентиля из проводящего состояния в запертое. Чередование запертого и проводящего состояний в противофазе для двух

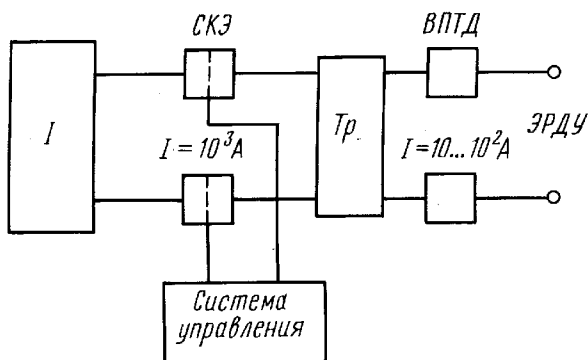


Рис. 1. Система электропитания ЭРДУ на высокотемпературных плазменных элементах:

I — РГТЭП, Тр — трансформатор, ВПТД — высокотемпературный диод

вентилей, подключенных к источнику электроэнергии постоянного тока — ТРП, позволяет получить в первичной обмотке трансформатора переменное напряжение, которое преобразуется в переменное высоковольтное и выпрямляется с помощью высокотемпературных диодов. Достоинством данной схемы служит высокая рабочая температура, так как каждый из элементов этой схемы может работать при рабочих температурах до $T_{\text{раб}} = 900 \text{ K}$ [8, 9]. Отпадает необходимость в теплоизоляции преобразователя от первичного источника электрической энергии, в низкотемпературных холодильниках-излучателях, стабилизирующих рабочую температуру преобразователя тока (как в случае полупроводниковых).

Исследование характеристик сеточных ключевых элементов в проводящем состоянии. Теоретическому и экспериментальному исследованию характеристик управляемых вентилей уделено достаточно много внимания [6, 8]. Исследования основного элемента управляемого вентиля — сеточных ключевых элементов (СКЭ) — проводились на металлокерамических моделях при следующих параметрах теплофизического состояния: рабочие давления паров цезия $p_{\text{Cs}} = 0,133 \dots 3 \text{ Па}$ и бария $p_{\text{Ba}} = 0,001 \dots 0,1 \text{ Па}$; температуры катода $T_{\text{к}} = 1200 \dots 1600 \text{ К}$ и анода $T_{\text{а}} = 700 \dots 1100 \text{ К}$.

Сеточный ключевой элемент имел плоско-цилиндрическую геометрию: величина межэлектродного зазора анод–катод составляла $2 \dots 4 \text{ мм}$, при этом сетка, размещенная в нем, имела толщину $1 \dots 2 \text{ мм}$; прозрачность (отношение площади отверстий к площади сетки) — $0,2 \dots 0,4$; диаметр сеточных отверстий $d_{\text{с}} = 0,5 \dots 1,5 \text{ мм}$. Результаты исследования проводящего состояния СКЭ показали, что в МЭЗ реализуется типичный несамостоятельный дуговой разряд с термоэмиссионным катодом, в котором падение напряжения на разряде (в зависимости от давления пара и длины МЭЗ) составило $\delta U_{\text{р}} = 1,5 \dots 5 \text{ В}$ при плотности разрядного тока $j_{\text{р}} = 3 \dots 10 \text{ А/см}^2$, что полностью согласуется с результатами многих исследований [8]. Характерные вольтамперные характеристики (ВАХ) разряда в проводящем состоянии приведены на рис. 2. Условно их можно разделить на две группы — ВАХ с участком насыщения по току и ВАХ с участком дифференциальной отрицательной проводимости СКЭ ($dj/dU < 0$). Важнейшими характеристиками СКЭ являются критические значения напряжения разряда $U_{\text{кр}}$ и плотности тока $j_{\text{кр}}$, характеризующие момент самопроизвольного обрыва тока в МЭЗ. Самопроизвольный обрыв разряда тока в МЭЗ свидетельствует о возможности управления критическими параметрами разряда с помощью внешнего воздействия — анодным потенциалом (линией нагрузки), сеточным потенциалом, внешним магнитным полем, анало-

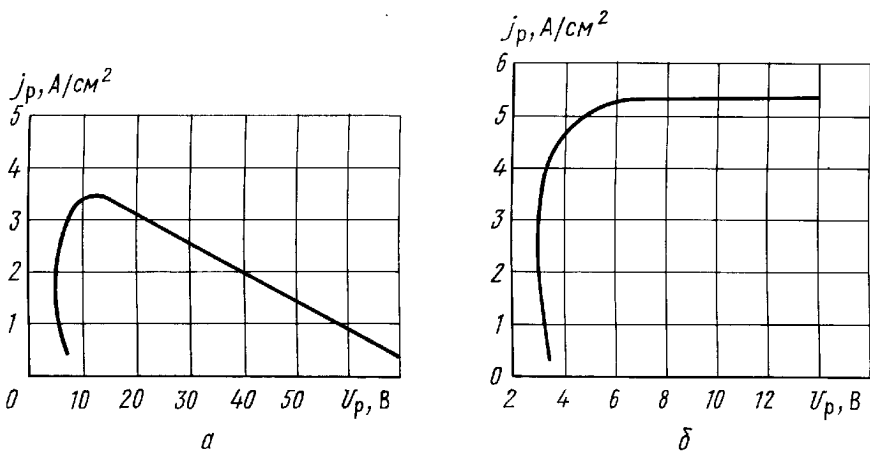


Рис. 2. Вольтамперная характеристика СКЭ:

$T_k = 1323$ К (*a*, *б*); $p_{Cs} = 0,718$ Па (*a*), $p_{Cs} = 1,077$ Па (*б*); $p_{Ba} = 0,04$ Па (*a*), $p_{Ba} = 0,025$ Па (*б*)

гично существующим газоразрядным приборам. Теоретическое исследование этого вопроса основывалось на анализе системы уравнений баланса заряженных частиц, давления компонентов плазмы, сохранения энергии и закона Ома с учетом воздействия на разряд в гетерогенной среде магнитного поля [8, 9], что позволило получить расчетные зависимости для критических параметров разряда:

$$j_{кр} = \frac{a_1(\alpha p - n_s)}{(1 + \chi B_{\perp}^2)^{1/2}};$$

$$U_{кр} = a_2 \left(1 - \frac{j_{e0}}{a_3 p} \right) (1 + \chi B_{\perp}^2)^{1/2},$$

где p — давление в МЭЗ; n_s — величина, характеризующая интенсивность взаимодействия заряженных частиц с внутренней поверхностью сетки; $\alpha = 12,8$ (А/см²/мкм рт.ст.) — коэффициент; B_{\perp} — индукция внешнего магнитного поля. Коэффициенты a_1 , a_2 , a_3 зависят от транспортных свойств плазмы, ионного тока на сетке, параметра n_s : $-f(l_{ea}, j_{кр}, n_s)$. Параметр χ определен в работе [10]. В целом, использование поперечного магнитного поля небольшой напряженности (до 300 Гс) позволяет эффективно управлять параметрами несамостоятельного дугового разряда в парах цезия и бария. Исследования проводящего состояния позволили оценить нагрузочную способность СКЭ по электрической мощности в зависимости от рабочих параметров и сделать вывод о возможности создания вентилях с удельной мощностью свыше 1 кВт/см² (в пересчете на единицу поверхности

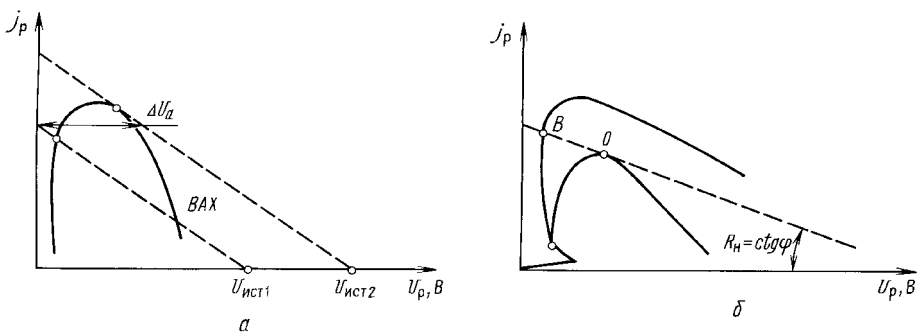


Рис. 3. Методы переключения тока с использованием свойств участка дифференциальной отрицательной проводимости:

а — “перемещается” линия нагрузки, управляющий импульс подается на анод СКЭ;
б — под действием внешнего фактора (сеточный импульс, магнитное поле) деформируется ВАХ СКЭ; В — рабочая точка ВАХ; О — критическая точка ВАХ

электрода), КПД $\eta = 84 \dots 88 \%$ при напряжении ТРП $100 \dots 120$ В и рабочей температуре $T_p = 900 \dots 1000$ К.

Управление в СКЭ. В основе управления СКЭ лежит деформация ВАХ разряда до касания (пересечения) линии нагрузки участка отрицательной проводимости (ОП), либо участка насыщения так, что параметры точки ВАХ удовлетворяют условию достижения критических значений плотности тока $j_{кр}$ и $U_{кр}$ (рис. 3). С увеличением анодного потенциала СКЭ (величина нагрузки постоянна) изменяется плотность тока до условия $j > j_{кр}$, т.е. точка совместной работы переходит из т. В в т. О ВАХ (см. рис. 3, *а*). В разряде формируются условия обрыва тока, и если импульс анодного смещения достаточно короткий, то при гашении разряда зажигания дуги в МЭЗ при напряжении источника $U_{пит}$ не произойдет, так как сетка экранирует поле анода. В случае подачи импульса на сетку СКЭ (см. рис. 3, *б*), происходит деформация ВАХ так, что $j_{кр} < j_p$. В этом случае также происходит обрыв тока и запираение СКЭ. Существует два режима работы сетки в зависимости от давления паров наполнителей и температуры сетки: сетка служит только для поджига разряда при положительной сеточной характеристике и поддержания СКЭ в запертом состоянии (при этом $U_{кр}$ не зависит от U_c) — тиратронный режим; сетка служит для гашения и поджига разряда (δU_p зависит от потенциала сетки) — таситронный режим.

Гашение дуги с помощью сеточного потенциала возможно лишь в той области рабочих параметров СКЭ и плазмы, где обеспечивается неравенство скоростей ионизации и рекомбинации, сопровождаемое в момент обрыва тока возможным увеличением концентрации ионов вследствие больших значений времени диффузии — $t_{диф}$, которое предотвращает обрыв разряда. Поэтому необходимо четко знать диапазон

параметров теплофизического состояния СКЭ, в котором реализуется полное управление разрядом в вентиле (гашение и поджиг). Выполненные работы показывают, что такое управление СКЭ возможно в достаточно узком диапазоне давлений пара цезия — $0,01 \dots 0,1$ Па, причем давление пара бария ($0,1 \dots 1$ Па) существенно выше [6], чем давление пара цезия. С увеличением давления пара цезия (более $0,13$ Па) сетка теряет управляющие свойства (из-за увеличения времени деионизации и снижения работы выхода ее поверхности, что способствует генерации заряженных частиц с эмиссией их в область анод–сетка). Обеспечение равновесия паровых фаз в МЭЗ СКЭ в таких случаях требует достаточно сложных конструктивных решений и снижает общую надежность СКЭ.

Проведенные исследования [8] показали возможность существенного расширения диапазона рабочего давления пара цезия в МЭЗ без потери управляемости. Один из способов — это наложение внешнего поперечного магнитного поля на дуговой разряд [8]. Преимущества такого способа следующие: независимость управления от полярности импульса, подаваемого на магнитную катушку; отсутствие прямой электрической связи между основной и управляющей электрическими цепями.

Особенно эффективен способ при $j_p \cong J_{кр}$, когда низковольтная самостоятельная дуга чувствительна к балансу скоростей ионизации и рекомбинации. В этом случае сетка выполняет роль коллектора электронов разряда, отклоняемых магнитным полем, что было подтверждено экспериментально. Гашение дуги обеспечивается сравнительно небольшими величинами импульса магнитного поля $B_{\perp} = 50 \dots 300$ Гс, при этом зависимости $B_{\perp} = f_1(j_{кр})$ и $U_{с.гаш} = f(j_{кр})$ носят схожий характер (рис. 4). Однако в отличие от сеточного режима управления, в случае магнитного способа управления обрыв тока в СКЭ обеспечивался при давлениях пара цезия вплоть до $p_{Cs} = 1 \dots 2,33$ Па, а давление пара бария было снижено на один-два порядка, что облегчило конструктивное исполнение систем подачи пара и регулирование равновесия паровых фаз наполнителей. Одновременно исследовано совместное воздействие поперечного магнитного поля и сеточного потенциала на гашение разряда в МЭЗ, которое показало, что в этом случае величина потребного сеточного потенциала снижается почти в 2 раза. Эффективность управления разрядом зависит от характера движения частиц в МЭЗ, а именно: при прямопролетном движении частиц эффект воздействия поля на разряд максимален, а с повышением давления пара цезия (свыше $6,65 \dots 10,4$ Па) влияние на ток B_{\perp} существенно снижалось. В результате исследований получены эмпирические зависимости, позво-

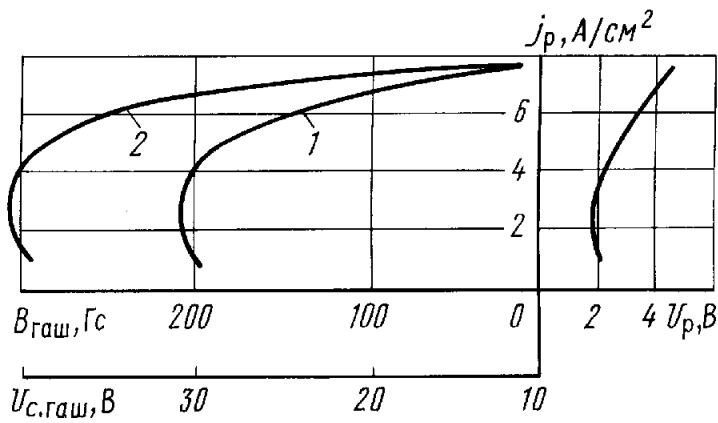


Рис. 4. Сравнение кривых управления СКЭ магнитным полем и сеточным импульсом:

$T_k = 1543$ К; $p_{Cs} = 0,69$ Па; $p_{Ba} = 0,028$ Па; 1 — $B = 0$ (сеточное управление); 2 — $U_{c,гаш} = 0$ (магнитное поле)

ляющие рассчитать величину сеточного потенциала, необходимого для гашения разряда в МЭЗ СКЭ:

$$U_{c,гаш} = AD_1(1 + \chi B_{\perp}^2)^{-1/6} \left(\frac{I_p}{n_{p0}} \right)^{2/3} \left(1 - \left(\frac{I_p(1 + \chi B_{\perp}^2)^{1/2}}{I_{kp}a} \right) \right), \quad (1)$$

где

$$A = \left[\left(\frac{0,5}{\pi} \sqrt{\frac{m_e k}{m_i e}} \right)^{1/2} \frac{m_i^{1/2}}{2,34 \cdot 10^{-4}} \right]^{4/3}; \quad D_1 = \frac{T_e}{\lambda_{ea} a_1 E_0};$$

n_{p0} — число “работающих” отверстий сетки (эффективное сечение для разрядного тока). Зависимость (1) позволяет увязать параметры теплофизического состояния СКЭ и характеристику внешнего магнитного поля B_{\perp} с параметром управления — $U_{c,гаш}$.

Генерация колебаний с помощью СКЭ. Сеточный ключевой элемент как нелинейный элемент при определенных условиях может служить источником колебаний тока. Существование явления самопроизвольного обрыва тока СКЭ, связанное с нарушением проводимости в сеточных отверстиях, указывает на возможность модуляции тока за счет изменения анодного потенциала или деформации ВАХ под внешним воздействием. Эквивалентная схема работы СКЭ как нелинейного элемента может быть рассмотрена на примере схемы, приведенной на рис. 5. Сеточный ключевой элемент заменяется тремя элементами — емкостью C_1 , индуктивностью L_1 , активной нагрузкой R_1 . Данная цепь описывается уравнениями Кирхгофа:

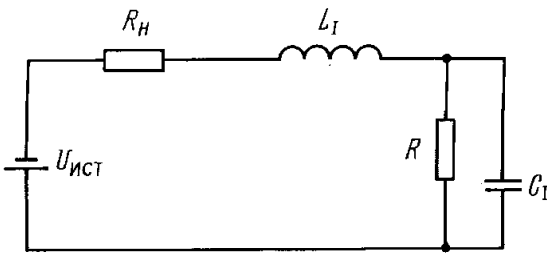


Рис. 5. Эквивалентная схема СКЭ как нелинейного элемента

$$E = i_1 R_H + L_1 \frac{di_1}{dt} + U; \quad (2)$$

$$i_1 = C_1 \frac{dU}{dt} + i_1(U).$$

Решение системы (2) находят из характеристического уравнения

$$y^2 + \sigma y + f = 0,$$

где $\sigma = 1/(L_1 C_1) + R_H/L_1$, $f = (R_H/R + 1)/(L_1 C_1)$.

Решение данного уравнения показывает области устойчивого и неустойчивого состояний СКЭ. Из анализа таких уравнений (теорема Рауза–Гурвица) достаточно хорошо известно, что решение носит устойчивый характер, если выполняются условия $\sigma > 0$, $f > 0$. Решение данного уравнения на плоскости $R_H - 0 - R$ представляет несколько областей, в которых определены величины σ , f в зависимости от электротехнических параметров СКЭ (L_1 , C_1 , R) и величины нагрузки R_H в цепи источника $E_{ист}$ (рис. 6). В областях I и II диаграммы состояния СКЭ работает как переключатель, в областях III и IV — как нелинейный элемент (активный усилитель), в областях V и VI — как колебательный контур (т.е. служит источником колебаний тока). Проведенные

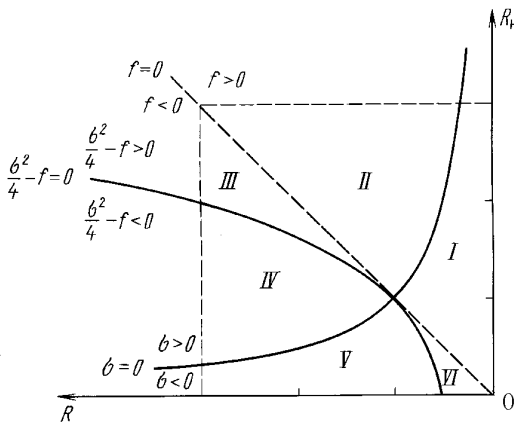


Рис. 6. Диаграмма состояния СКЭ в зависимости от параметров внешней цепи

эксперименты с СКЭ с объемной сеткой показали, что в области V СКЭ — это источник гармонических колебаний, а в области VI — источник релаксационных колебаний [11, 12]. Частоты колебаний составили от единиц кГц до 100 кГц. Следует отметить, что для обеспечения режима колебаний в СКЭ необходимо создать положительную обратную связь по напряжению, охватывающую не менее двух источников изменения проводимости вентиля. В качестве источников управления применительно к цезий-бариевым СКЭ могут выступать:

внутренние факторы — эмиссионная способность пленочного термоматода, соотношение скоростей ионизации и рекомбинации, подвижность заряженных частиц в МЭЗ, сечение прохождения тока;

внешние факторы — тепловой режим прибора, геометрия МЭЗ, давление паров наполнителя (цезия, бария), величина и направление внешнего магнитного поля, управляющий разряд в МЭЗ.

В целом, результаты экспериментов свидетельствуют о возможности использования СКЭ с объемной сеткой в качестве источника колебаний в электрической цепи.

Микромодульный СКЭ. Одним из способов повышения эффективности управления СКЭ благодаря вспомогательному разряду является организация вентиля с микромодульной структурой МЭЗ [13]. Идея использования вспомогательного разряда связана с уменьшением внутренних потерь напряжения на низковольтной дуге: необходимая энергия для ионизации сообщается малому количеству электронов, источником которых служит вспомогательный эмиттер, а электроны основного эмиттера в ионизации не участвуют. Полная управляемость такого прибора обеспечивается тем, что плазма в нем образуется лишь при включении цепи вспомогательного разряда (т.е. при подключении вспомогательного эмиттера). Суть организации микромодульной структуры МЭЗ заключается в послойном расположении между катодом и анодом СКЭ вспомогательных электродов и изоляторов, которые имеют совмещенные полости, образованные отверстиями в электродах и изоляторах. Внутри этих полостей и протекает рабочий процесс. В качестве электродов использовали пластинки из вольфрама, молибдена и платины толщиной 20...25 мкм, а в качестве изоляторов — синтетическую слюду толщиной 15 мкм, при этом на электроды дополнительно наносили оксид алюминия слоем толщиной 15...100 мкм (рис. 7). В результате суммарная величина МЭЗ в таком СКЭ достигала 0,3...1,2 мм при наборе в четырех-пяти электродах, и таким образом в нем реализовался как плазменный, так и вакуумный режим работы. Одновременно такой подход позволил отказаться от бинарного наполнения МЭЗ и перейти к использованию только паров цезия, что существенно улуч-

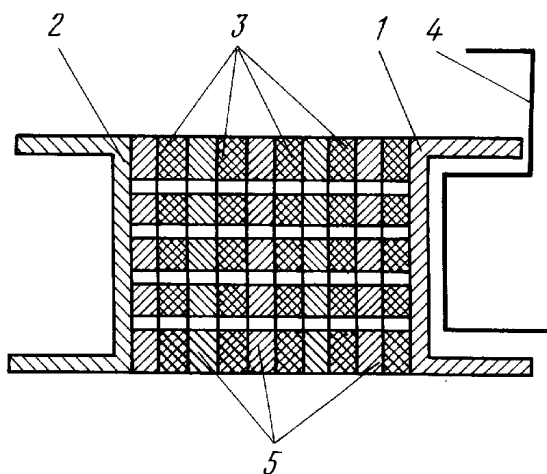


Рис. 7. Схема микромодульного СКЭ:

1 — термоэмиссионный катод; 2 — анод; 3 — изоляторы-дистанционаторы; 4 — спираль накала катода; 5 — промежуточные электроды (управляющие)

шило тепловой режим СКЭ. Исследования проводили в диапазоне температур катода $T_k = 800 \dots 1400$ К. Использовали следующие способы управления разрядом в СКЭ: стимуляцию и гашение основного дугового разряда при помощи внутреннего разряда при отсутствии прямой электрической связи между ними; гашение основного разряда вспомогательным разрядом при наличии прямой электрической связи; гашение разряда и деформацию ВАХ внешним вспомогательным разрядом; гашение основного разряда внешним магнитным полем (поперечным).

Использование вспомогательного внутреннего разряда с напряжением $U_p = 0,1 \dots 0,3$ В прямой полярности позволяет увеличить в $2 \dots 3$ раза плотность разрядного тока в СКЭ, при этом падение напряжения разряда на микромодульном СКЭ составляет $\delta U_{СКЭ} = 0,5 \dots 1,5$ В. Включение вспомогательного внутреннего разряда обратной полярности с $\delta U_{всп} = -1 \dots -4$ В позволяет увеличить напряжение основного разряда СКЭ $\delta U_{СКЭ} = 2,5 \dots 7,5$ В и снизить величину критического тока почти в 3 раза. Гашение внешним вспомогательным разрядом (при неизменных теплофизических параметрах СКЭ — температуре электродов и давлении пара в МЭЗ) происходит при несколько больших величинах напряжения — $\delta U_{всп} = 6 \dots 10$ В.

Управление СКЭ внешним поперечным магнитным полем носит характер, схожий с управлением СКЭ вспомогательным разрядом, и аналогично управлению СКЭ с объемной сеткой (сеточным импульсом или внешним магнитным полем). Величины индукции магнитного поля, прерывающего разряд, составили $120 \dots 500$ Гс, что связано, по-видимому, с прямопролетным режимом движения частиц в МЭЗ

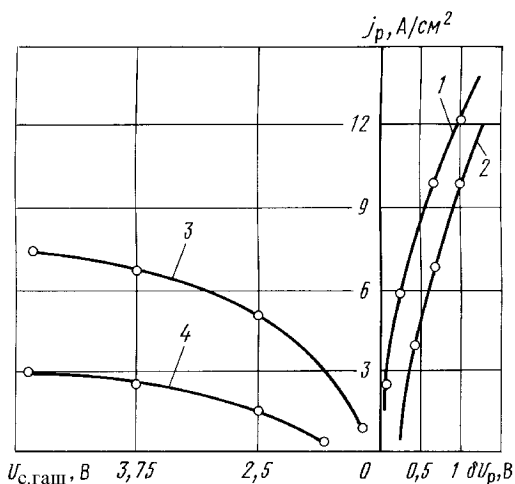


Рис. 8. Вольтамперные и управляющие характеристики микромодульного секционного ключевого элемента:

$T_k = 1450$ К; $T_a = 900$ К; $p_{CS} = 0,92$ Па

микромодульного СКЭ. Типичные экспериментальные ВАХ и характеристики управления микромодульным СКЭ приведены на рис. 8. Микромодульная конструкция СКЭ позволяет на основе пленочной технологии реализовать низковольтный (до 10 В) сильноточный преобразователь тока.

Исследование электрической прочности вентилях к обратному дуговому пробою. Обеспечение электрической прочности МЭЗ термоэмиссионных диодов при повышенных температурах электродов — актуальная проблема в решении задачи надежного функционирования системы преобразования тока. Экспериментальное исследование электропрочностных характеристик и проводящего состояния высоковольтного вентиля было проведено на модели, схема которой приведена на рис. 9 [14]. В процессе исследований были испытаны вентили со следующим парами электродов (эмиттер указан первым): коррозионно-стойкая сталь–коррозионно-стойкая сталь; коррозионно-стойкая сталь–тантал; молибден–молибден; молибден–коррозионно-стойкая сталь.

Диапазон изменения теплофизических параметров состояния следующий: давление пара цезия — 1...50 Па, бария — 0,06...0,1 Па; температура пара (“холодного” электрода) $T_{пк} = 580...1050$ К.

Характер и вид зависимостей напряжения пробоя МЭЗ в зависимости от давления пара цезия и температуры пара $U_{проб}(p_{CS}, T_{пк})$ приведены на рис. 10, [14–19]. Экспериментально полученный результат, свидетельствующий об определяющей роли транспортных и теплофизических

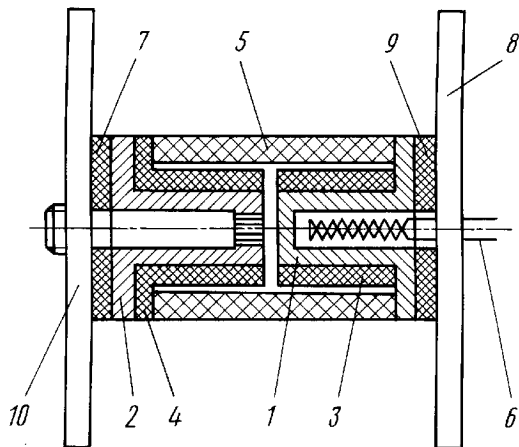


Рис. 9. Схема экспериментального диода:

1 — катод; 2 — анод; 3, 4 — изолирующие втулки электродов; 5 — диэлектрический корпус; 6 — нагреватель катода; 7 и 9 — диэлектрические кольца; 8 и 10 — фланцы

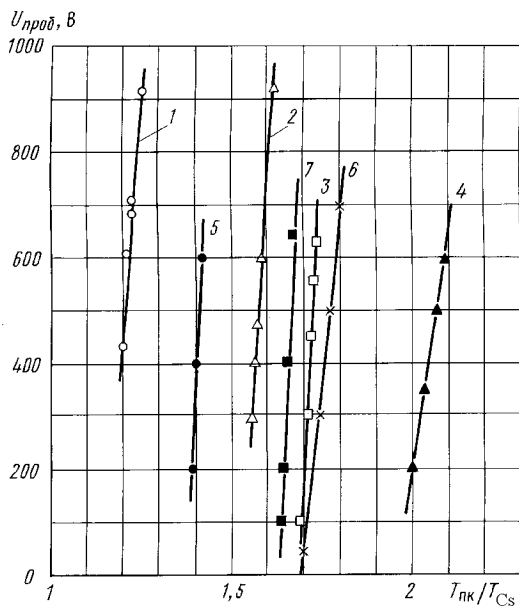


Рис. 10. Зависимости пробойного напряжения МЭЗ от теплофизических параметров ВПД:

1...7 — $T_a = 620; 718; 820; 922; 637; 755; 772$ К соответственно; 4 — анод — коррозионно-стойкая сталь X18H10T; 5 — анод — тантал; 7 — анод — молибден; $\Delta_{МЭЗ} = 3,5 \dots 7,8$ мм

зических свойств паров цезия в обеспечении электрической прочности к обратному дуговому пробою и независимости величины $U_{\text{проб}}$ от длины МЭЗ, указывает на возможность оптимизации длины зазора по потерям напряжения в проводящем состоянии для увеличения КПД диода. Получена следующая зависимость для пробойного напряжения:

$$U_{\text{проб}} = \left((T_a^* - T_{a0}) \frac{\chi_{a,\text{реак}}^2 m_a}{\varepsilon_0 k e n_a} \right)^{1/3},$$

где $\chi_{a,\text{реак}}$ — реактивная теплопроводность возбужденных атомов, T_a^* — критическая величина температуры атомов в “астроновом пространстве”, с которой начинается переход в самостоятельный дуговой разряд. Расчеты, выполненные по данной зависимости, показывают область возможных давлений паров цезия и их границы, которые хорошо коррелируют с результатами экспериментального исследования. Как показали исследования, использование цезиевых вентилях наиболее эффективно при рабочих температурах анода не более 700...730 К, так как в дальнейшем ухудшаются электропрочностные характеристики и тепловой режим работы. Использование вентилях с бинарным или бариевым наполнением наиболее эффективно при температурах анода 800...900 К [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фаворский О. Н., Фишгойт Ф. В., Янтовский Е. Н. Основы теории космических электрореактивных установок. — М.: Высшая школа, 1978.
2. Электроядерный буксир в программе перспективных задач освоения космоса / В.П. Агеев, П.И. Быстров, А.А. Масленников и др. // ПАКТ. — 1994. — № 2. — С. 36–39.
3. Куландин А. А., Тимашов С. В., Атамасов В. Д. Основы теории, конструкции и эксплуатации космических ЯЭУ. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 328 с.
4. Ситник Н. Х. Силовая полупроводниковая техника. — М.: Энергия, 1968.
5. Лекоргийе Ж. Управляемые электрические вентили и их применение. — М.: Энергия, 1971.
6. Марциновский А. М. Плазменные ключевые элементы (Обзор) // Конф. по термоэмиссионному преобразованию тепловой энергии в электрическую. Тезисы докладов. — Обнинск. — 1979. — С. 5.
7. Кайбышев В. З., Кузин Г. А. О возможности использования термоэмиссионного преобразователя для управления током в электрических цепях // ЖТФ. — 1972. — Т. 42. Вып. 6. — С. 12–65.
8. Пекшеев П. Ю., Баранников А. Л. Газоразрядные приборы с отрицательной проводимостью // Изв. Сиб. отд. АН СССР. Серия. Технические науки. — 1977. — № 8. Вып. 2. — С. 140.
9. Пекшеев П. Ю., Баранников А. Л. Газоразрядные приборы с отрицательной проводимостью // Изв. Сиб. отд. АН СССР. Серия. Технические науки. — 1978. — № 8. — Вып. 2. — С. 62–77.

10. К о н е н к о О. Р., М у с и н А. К. Распределение заряженных частиц и потенциала в неоднородном положительном столбе // ЖТФ. – 1972. – Т. 42. Вып. 4. – С. 782–788.
11. П е к ш е в П. Ю., С и р о т к и н Б. А. Автогенерация колебаний с помощью сильноточного цезиевого триода // Конф. “Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении”. - М.: МВТУ имени Н.Э. Баумана, 1980. – С. 49.
12. П е к ш е в П. Ю., С и р о т к и н Б. А. Исследование рабочего процесса в цезиевых термоэмиссионных приборах с новой конструкцией межэлектродного промежутка // Конф. “Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении”. – М.: МВТУ имени Н.Э. Баумана, 1980. – С. 50.
13. И с с л е д о в а н и е микромодульной конструкции термоэмиссионных приборов / П.Ю. Пекшев, Б.А. Сироткин, О.А. Потеряхин и др. // Конф. по термоэмиссионному преобразованию тепловой энергии в электрическую. Тезисы докладов. – Обнинск. – 1979. – С. 33.
14. О н у ф р и е в В. В. К вопросу о возможности использования термоэмиссионного паронаполненного диода в качестве высоковольтного высокотемпературного вентиля // Юбилейная конф. посв. 100-летию А.В. Квасникова. Тезисы докладов. – М.: МАИ, 1992. – С. 65.
15. О н у ф р и е в В. В. Влияние энергетического баланса атомов в катодном слое на поджиг дугового разряда в газонаполненном диоде // Вторая отрасл. конф. “Ядерная энергетика в космосе”. Тезисы доклада. – Сухуми. – 1992. – С. 278–289.
16. О н у ф р и е в В. В., Г р и ш и н С. Д. Экспериментальное исследование электрической прочности к обратному дуговому пробую термоэмиссионного диода с цезиевым наполнением // ТВТ. – 1996. – Т. 34. – № 3. – С. 482–485.
17. O n u f r i e v V. V., G r i s h i n S. D. The high-temperature plasma systems of the electrical current conversion for powerful ERT // 24-th IEPC-95. – (Moscow, September 1995), Russia. – (IEPC-130). – PP. 197–198.
18. О н у ф р и е в В. В. Результаты экспериментального исследования параметров вентиля с цезиевым наполнением и анодами из различных материалов // VIII Конф. по Физике газового разряда. Тезисы доклада. – Рязань: РГРТА, 1996. – С. 102–103.
19. П а т е н т РФ № 2111605, МКИ Н 01 j 45/00, от 20.05.1998 г. Онуфриев В.В. Способ выпрямления переменного тока и устройство для его осуществления.

Статья поступила в редакцию 19.09.2002

Валерий Валентинович Онуфриев родился в 1956 г., окончил в 1979 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области плазменных преобразователей тока, космических энергосистем и электроракетных двигательных установок.

V.V. Onufriev (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1979. Ass. professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 50 publications in the field of plasma current transducers, space power systems and electric and rocket propulsion units.