

Методика расчета электропрочностных и выходных электрических характеристик выпрямительных диодов и сравнения их электрических параметров

© Е.В. Онуфриева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Основная проблема разработки выпрямительных диодов, используемых в энерго-двигательных установках космических аппаратов, — определение их рабочего напряжения (или напряжения обратного дугового пробоя в запертом состоянии), которое наряду с плотностью тока в проводящем состоянии определяет электро-энергетические характеристики. Предложена методика расчета электропрочностных характеристик выпрямительного диода. В ней объединены несколько математических моделей для расчета распределения напряженности электрического поля, потенциала и температуры атомов цезия в катодном ионном слое в режиме обратного тока, а также для исследования резонансных свойств системы (получение амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик) и электропрочностных характеристик выпрямительного диода (определение напряжения обратного пробоя диода). При совместном применении численного, полуэмпирического и аналитического подходов могут быть рассчитаны и обоснованы такие выходные характеристики диода, как пробойное и рабочее напряжение, которые используются для сравнения выходных электроэнергетических характеристик диодов и обоснования возможности применения выпрямительных диодов в той или иной системе преобразования тока.

Ключевые слова: *электроракетные двигатели, космический аппарат, выпрямительный диод, напряжение обратного дугового пробоя, электропрочностные характеристики, рабочая температура, запертое и проводящее состояния*

Введение. В развитии современной ракетно-космической техники особая роль отводится двигателестроению, так как конструктивные особенности и основные показатели двигательных установок определяют энергетические, эксплуатационные и экономические характеристики ракетно-космических систем [1–3]. Проблема создания перспективных систем преобразования тока и напряжения (СПТ) связана с разработкой надежных энергоемких элементов, на базе которых они строятся, в том числе выпрямительных диодов. Она особенно актуальна для тех отраслей промышленности, в которых технологические процессы протекают при повышенных температурах, ухудшающих рабочие характеристики и снижающих надежность изделий, что может привести к аварийным ситуациям.

Проектирование СПТ, построенной на основе выпрямительных диодов, базируется на выборе таких их рабочих теплофизических параметров, которые обеспечивали бы требуемые рабочий ток, рабочее

напряжение, обратный ток (ток утечки), падение напряжения в проводящем состоянии, определяющее КПД диода, частотный рабочий диапазон [4].

Общее требование к СПТ — энергетическая эффективность (т. е. КПД), связанная с потерями электрической энергии на ее элементах в процессе преобразования тока (потери напряжения, показывающие величину джоулевых потерь, которые придется отводить в окружающее пространство). Еще один важный фактор, влияющий на работу СПТ, — температура, обеспечивающая работоспособность элементной базы, т. е. при определенных условиях функционирования диодов возникает необходимость в системе термостабилизации, на которую, в свою очередь, потребуются дополнительные затраты электрической энергии, что снижает полный КПД СПТ.

Цель работы — разработка методики расчета электрических характеристик выпрямительного диода для обоснования возможности использовать системы преобразования тока в тех отраслях, где рабочие процессы реализуются при повышенных температурах, и оптимизации параметров таких систем.

Методика расчета. В основу расчета положен многопараметрический подход, позволяющий оптимизировать характеристики диода: мощность, рабочее напряжение, КПД, рабочую температуру и др. Разработанный алгоритм методики расчета электропрочностных и выходных электрических характеристик выпрямительных диодов включает в себя два этапа:

этап 1 — исследование выходных электрических характеристик на основе моделей рабочего процесса в проводящем и запертом состояниях;

этап 2 — исследование электропрочностных характеристик диодов (определение напряжения обратного пробоя диода) по условию функционирования — рабочей температуре.

Этап 1 (рис. 1) состоит:

- из математической модели процессов в проводящем и запертом состояниях диода;
- математической модели совместной работы эквивалентной нелинейной цепи «источник — диод — нагрузка».

Применительно к газоразрядным диодам для расчета выходных электрических характеристик (см. рис. 1) используют:

- математическую модель токопереноса, энергообмена и расчета напряжения зажигания обратного дугового пробоя в непроводящем состоянии [5–8], которая базируется на тепловом балансе атомной компоненты в катодном ионном слое тлеющего разряда (уравнения движения электронов, ионов, атомов, Пуассона, Дальтона, массопереноса, Фурье, граничные условия);
- математическую модель токопереноса в проводящем состоянии [9–14].

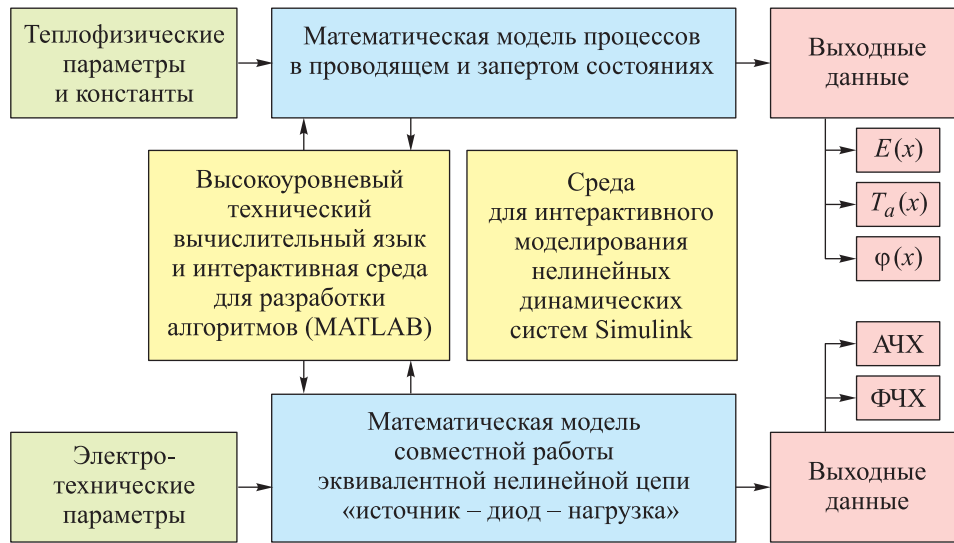


Рис. 1. Этап 1 алгоритма методики расчета — исследование выходных электрических характеристик

На основе модели из работы [7] в [6] получено точное численное решение самосогласованной системы уравнений для катодного слоя тлеющего разряда с неэмиттирующим отрицательным электродом, которая была решена с помощью программного комплекса MATLAB/Simulink [15]. Математическая модель представляет собой взаимосвязанную систему дифференциальных уравнений в MATLAB/Simulink, состоящую из следующих блоков: интеграторов, множителей, делителей, сумматоров и т. д., объединенных между собой прямыми и обратными связями:

$$\frac{dE(x)}{dx} = E(x) \left[\frac{n_a Q_{ia}}{2} + \left(\left(\frac{n_a Q_{ia}}{2} \right)^2 + \frac{2}{5} \frac{k}{\chi_a} \left(\frac{2^{1/2} e n_a}{m_a Q_{ia}} \right) E^{1/2}(x) \right)^{1/2} \right], \quad (1)$$

$$\frac{d^2 T_a(x)}{dx^2} = \frac{\varepsilon_0}{\chi_a} \left(\frac{2^{1/2} e}{m_a n_a Q_{ia}} \right)^{1/2} E^{3/2}(x) \frac{dE(x)}{dx},$$

где $E(x)$ — распределение напряженности поля в слое; n_a — концентрация атомов; Q_{ia} — сечение взаимодействия (перезарядки) ион-атом; k — постоянная Больцмана; χ_a — коэффициент теплопроводности пара цезия; e — заряд электрона; m_a — масса атома цезия; $T_a(x)$ — распределение температуры атомов пара цезия; ε_0 — диэлектрическая постоянная.

Результаты исследования численного моделирования (в MATLAB/Simulink) процессов токопереноса и энергообмена на основе энергетической модели ионного слоя в режиме обратного тока выпрямительно-го диода приведены на рис. 2–4.

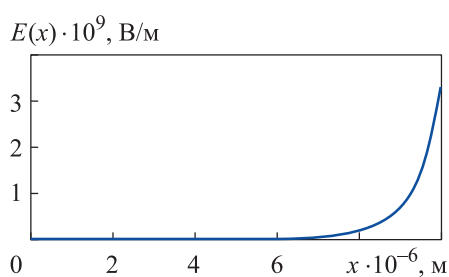


Рис. 2. Распределения напряженности электрического поля в катодном ионном слое в режиме обратного тока

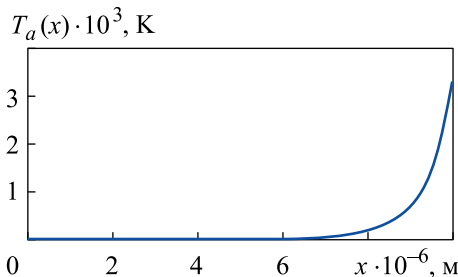


Рис. 3. Распределение температуры пара цезия в катодном ионном слое в режиме обратного тока

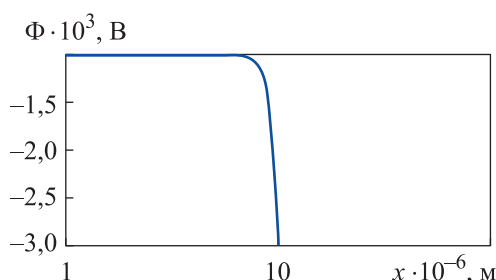


Рис. 4. Распределение потенциала электрического поля в катодном ионном слое в режиме обратного тока

В работе [16] рассмотрена эквивалентная электрическая цепь в нелинейном приближении, которую можно описать с помощью уравнения Дуффинга [17]:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{L_n + \left(\frac{C_{\text{диод}}}{C_{\text{ист}}} + 1 \right) L_{\text{диод}} + C_{\text{диод}} R_{\text{диод}} R_n}{L_n C_{\text{диод}} R_{\text{диод}}} \frac{di}{dt} + \frac{\left(\frac{C_{\text{диод}}}{C_{\text{ист}}} + 1 \right) R_{\text{диод}} + R_n}{L_n C_{\text{диод}} R_{\text{диод}}} (ai + bi^3) = g(t). \quad (2)$$

Здесь $g(t)$ — функция, представляющая собой ступенчатое единичное воздействие (при исследовании амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик); i — ток в цепи; L_n — индуктивность нагрузки; $C_{\text{диод}}$ — емкость диода; $C_{\text{ист}}$ — емкость источника; $L_{\text{диод}}$ — индуктивность диода; $R_{\text{диод}}$ — сопротивление диода; R_n — сопротивление нагрузки; a, b — эмпирические коэффициенты. Наличие тока в третьей степени в уравнении (2) отражает нелинейность и наличие индуктивности в цепи.

С помощью MATLAB/Simulink (с использованием сумматоров, делителей, умножителей, дифференцирующих и интегрирующих звеньев,

операционных усилителей) реализована блок-схема уравнения математической модели совместной работы эквивалентной нелинейной цепи, которая дает возможность получать решение в виде либо сигнала тока, либо отклика на внешнее воздействие. Такой подход позволяет проводить многопараметрическое исследование задачи путем варьирования входящих в уравнение (2) емкости, индуктивности, сопротивления, благодаря чему можно определить режимы работы эквивалентной нелинейной цепи «источник — диод — нагрузка».

Результаты решения уравнения относительно амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик цепи получены в программном комплексе MATLAB/Simulink при следующих общих исходных параметрах: $L_n = 10^{-5}$ Гн; $C_{ист} = 10^{-4}$ Ф; ЭДС источника $E_{ист} = 150$ В; коэффициенты $a = 10$, $b = 150$ подобраны эмпирически; $R_{диод} = 0,01$ Ом; $g(t)$ — единичная функция, которая подается на вход колебательной системы для получения картины отклика и ее резонансных свойств.

В ходе исследования варьировались $L_{диод}$ от 10^{-2} до 10^{-9} Гн, $C_{диод}$ от 10^{-2} до 10^{-9} Ф, а также учитывалось влияние активного сопротивления нагрузки R_n .

Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики при $C_{диод} = 10^{-2}$ Ф, $R_n = 0,01$ Ом (режим короткого замыкания) представлены на рис. 5, а, б соответственно. В режиме, близком к короткому замыканию ($R_n = 0,01$ Ом), амплитуда тока достигает $I \approx 14 \cdot 10^3$ А при индуктивности диода $L_{диод} = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ Гн и $I \approx 7 \cdot 10^3$ А при $L_{диод} = 10^{-7}$ Гн. При значениях индуктивности $L_{диод} = 10^{-2} \dots 10^{-6}$ Гн в системе имеет место большое затухание, обусловленное низкой добротностью, и резонанс подавляется.

Этап 2 — исследование электропрочностных характеристик диодов (определение напряжения обратного дугового пробоя диода) (рис. 6), включает:

- расчет напряжения обратного дугового пробоя газоразрядных (с различным наполнением) диодов по аналитическим зависимостям [6];
- расчет напряжения обратного дугового пробоя газоразрядных диодов по полуэмпирическим зависимостям [5];
- справочные данные по результатам экспериментальных исследований (твердотельных, газоразрядных диодов) [5, 7, 22–25].

На этапе 2 расчет может проводиться в зависимости от типа диода (твердотельный или газоразрядный) по соответствующим известным моделям или по справочной информации, обработанной в виде функциональных зависимостей для получения требуемой конечной информации по электроэнергетическим характеристикам. Для твердотельных диодов используются модели [18–22], для газоразрядных диодов аналогичная информация может быть получена из [4–14, 22, 23].

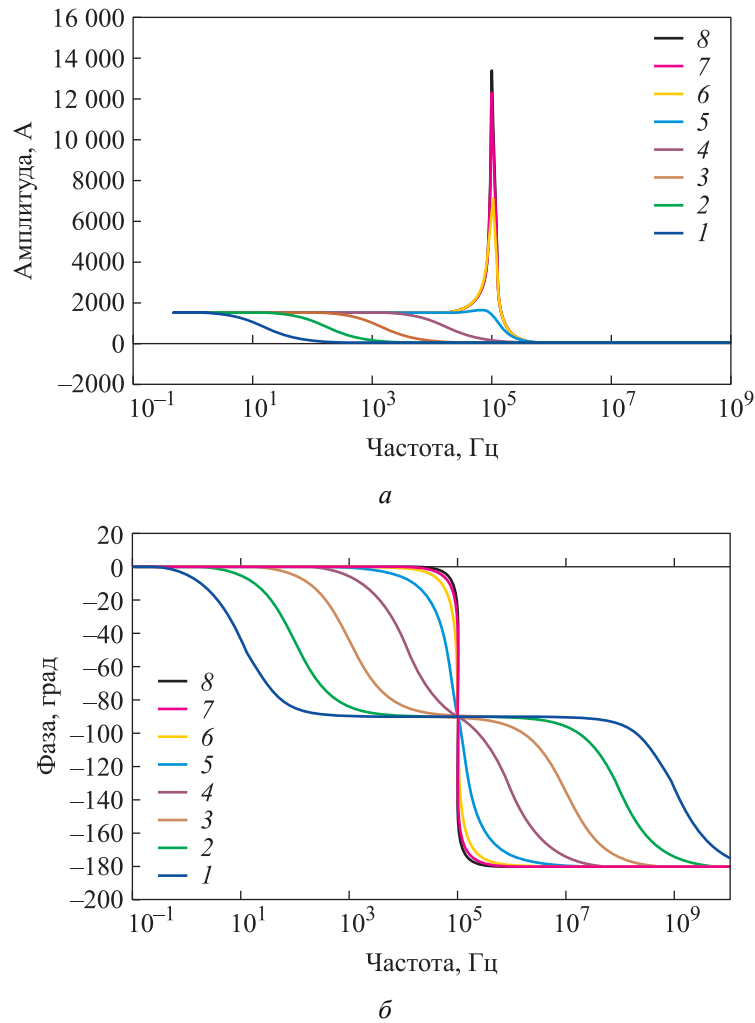


Рис. 5. Характеристики амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) при различных значениях индуктивности диода:

1 — $L_{\text{диод}} = 10^{-2}$ Гн; 2 — $L_{\text{диод}} = 10^{-3}$ Гн; 3 — $L_{\text{диод}} = 10^{-4}$ Гн; 4 — $L_{\text{диод}} = 10^{-5}$ Гн;
 5 — $L_{\text{диод}} = 10^{-6}$ Гн; 6 — $L_{\text{диод}} = 10^{-7}$ Гн; 7 — $L_{\text{диод}} = 10^{-8}$ Гн; 8 — $L_{\text{диод}} = 10^{-9}$ Гн

В статье [6] авторами получена формула для расчета напряжения обратного дугового пробоя $U_{\text{п}}$ газоразрядного диода по новой аналитической зависимости

$$U_{\text{п}} = \left\{ \left[\left[\frac{8 q^2 \pi m_a}{9 k^3 n_a^2} \right]^{1/3} - T_{a0} \right] \frac{m_a}{e k \epsilon_0 n_a} \left[\frac{75 \sqrt{\pi k^3} \left(\frac{8 q^2 \pi m_a}{9 k^3 n_a^2} \right)^{1/6}}{64} \frac{1}{\left(a \ln \left[\frac{8 q^2 \pi m_a}{9 k^3 n_a^2} \right]^{1/3} + b \right) c} \right] \right\}^{1/3}, \quad (3)$$

где q — удельный тепловой поток в предпробойном состоянии; T_{a0} — температура пара (температура отрицательного электрода); a, b, c — константы, зависящие от щелочного металла, используемого в качестве парового наполнителя межэлектродного зазора диода.

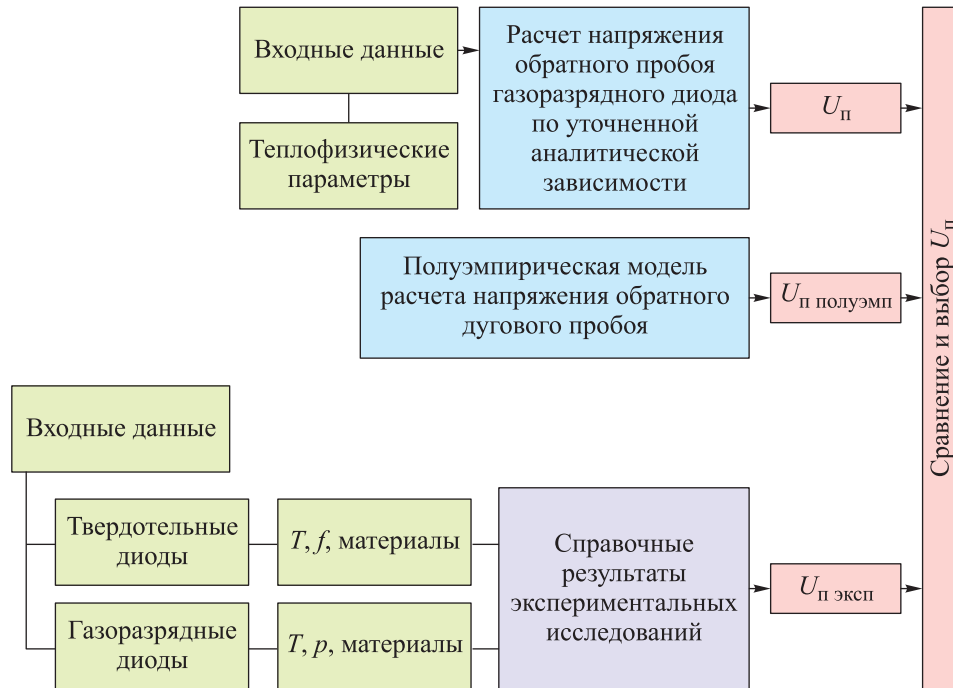


Рис. 6. Этап 2 алгоритма методики расчета — исследование электропрочностных характеристик диодов

В работе [5] получено выражение для предпробойной плотности тока $j_{кр}$ в межэлектродном зазоре (МЭЗ):

$$j_{кр} = \left(1 + \gamma_{i\Sigma}\right) \left[\varepsilon_0 \left(\frac{2^{-7/3}}{5^{5/3}}\right) \left(\frac{k}{\chi_{ar}}\right)^{5/3} \left(\frac{e}{m_a}\right)^{4/3} Q_{ia}^{1/3} U_{п}^{7/3} n_a^2 \right] \quad (4)$$

где $\gamma_{i\Sigma}$ — коэффициент, учитывающий ток вторичной электронной и термоэлектронной эмиссии с поверхности анода; χ_{ar} — «реактивная» теплопроводность.

Выражение (4) позволяет рассчитать величину напряжения зажигания обратного дугового разряда в МЭЗ выпрямительного диода (в режиме обратного тока) в зависимости от концентрации атомов пара цезия n_a и плотности предпробойного тока $j_{кр}$:

$$j_{кр} = C_1 U_{п}^{7/3} n_a^2, \quad (5)$$

где C_1 — константа,

$$C_1 = (1 + \gamma_{i\Sigma}) \left[\varepsilon_0 \left(\frac{2^{-7/3}}{5^{5/3}} \right) \left(\frac{k}{\chi_{ar}} \right)^{5/3} \left(\frac{e}{m_a} \right)^{4/3} Q_{ia}^{1/3} \right]. \quad (6)$$

Справочные экспериментальные результаты [4, 24] позволяют получать точное значение напряжения обратного пробоя $U_{п.эксп}$ в зависимости от параметров теплофизического состояния как твердотельного, так и газоразрядного диода.

Таким образом, благодаря совместному применению численного, полуэмпирического и аналитического подходов могут быть рассчитаны и обоснованы пробойное и рабочее напряжение диода.

Эти характеристики положены в основу сравнения выходных электроэнергетических характеристик диодов и обоснования возможности применения выпрямительных диодов в той или иной системе преобразования тока.

Оценка диодов по требуемой номинальной мощности проводится для твердотельных диодов на основе информации по токовым характеристикам (справочной информации или полученной на основе полуэмпирических зависимостей). Для газоразрядных диодов расчет токовой нагрузки выполняется исходя из рабочей плотности тока и требуемой площади электрода — катода.

Заключение. Предложена методика расчета электропрочностных и выходных электрических характеристик выпрямительных диодов электроракетных двигательных установок космических аппаратов и сравнения их электрических параметров, которая позволяет проводить оптимальный выбор его электроэнергетических характеристик с учетом параметров теплофизического состояния и материалов электродов. В основу расчета положен многопараметрический подход, позволяющий оптимизировать характеристики диода (мощность, рабочее напряжение, КПД, рабочую температуру и т. д.), которые включают в себя электроэнергетические и эксплуатационные параметры. В результате на основе совместного применения численного, полуэмпирического и аналитического подходов могут быть рассчитаны выходные электропрочностные характеристики выпрямительного диода — пробойное и рабочее напряжение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. *Электрические ракетные двигатели*. Москва, Машиностроение, 1975, 272 с.
- [2] Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янговский Е.И. *Основы теории космических электроракетных двигательных установок*. О.Н. Фаворский, ред. Москва, Высшая школа, 1970.
- [3] Квасников Л.А., Латышев Л.А., Пономарев-Степной Н.Н., Севрук Д.Д., Тихонов В.Б. *Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов*. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва, Изд-во МАИ, 2001, 480 с.

- [4] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б. *Физические основы построения и проектирования высокотемпературных систем преобразования тока космических энергодвигательных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 167 с.
- [5] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Гришин Ю.М., Сидняев Н.И., Синявский В.В., Ивашкин А.Б. О расчете напряжения зажигания обратного дугового разряда в высоковольтном плазменном термоэмиссионном диоде. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2018, № 4, с. 108–115.
- [6] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В. К вопросу о расчете напряжения обратного дугового пробоя высоковольтного термоэмиссионного диода и его предельной удельной электрической мощности. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2023, № 2, с. 46–57.
- [7] Онуфриев В.В. Влияние энергетического баланса атомов в катодном слое на поджиг дугового разряда в газонаполненном диоде. *Сборник трудов 2-й Отраслевой конференции «Ядерная энергетика в космосе. Физика термоэмиссионных преобразователей энергии» (Сухуми, 28 октября — 2 ноября 1991 г.)*. Сухуми, 1991, с. 278–287.
- [8] Анциферов Д.А., Онуфриев В.В., Онуфриева Е.В. Исследование электрической мощности высоковольтного плазменного термоэмиссионного диода от теплофизических параметров и типа рабочего тела. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-9-2210
- [9] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Мустафаев А.С. и др. Импульсное управление током сильноточного низковольтного разряда на смеси паров цезия и бария. *Журнал технической физики*, 1977, т. 47, вып. 10, с. 2068–2078.
- [10] Бакшт Ф.Г., Каплан В.Б., Костин А.А. и др. Исследование стационарного проводящего состояния сеточного ключевого элемента. *Журнал технической физики*, 1978, т. 48, вып. 11, с. 2273–2293.
- [11] Каплан В.Б., Макаров А.Н., Марциновский А.М., Новиков А.Б. и др. Низковольтный высокотемпературный ключевой элемент нового типа для преобразования постоянного тока в переменный. *Журнал технической физики*, 1977, т. 47, вып. 2, с. 274–297.
- [12] Бабанин В.И., Каплан В.Б., Колышкин В.Н. и др. Сильноточный ключевой элемент с Cs-Va наполнением в нестационарном режиме разряда. *Всесоюз. конф. по термоэмиссионному методу преобразования тепловой энергии в электрическую: Тезисы докладов*. Обнинск, 1979, с. 91.
- [13] Богомолов И.В., Кузин Г.А., Юрченко А.А. Экспериментальное исследование высокотемпературных вентилях на большие плотности тока. *Всесоюз. конф. по термоэмиссионному методу преобразования тепловой энергии в электрическую*. Обнинск, 1979, с. 96.
- [14] Бакшт Ф.Г., Мойжес Б.Я. К теории низковольтной дуги в цезии. *Журнал технической физики*, 1965, т. 35, вып. 2, с. 266–278.
- [15] Дьяконов В.П. *«MATLAB 6.5 SPI/7 + Simulink 5/6» в математике и моделировании*. Москва, СОЛОН-Пресс, 2005, 576 с.
- [16] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б., Синявский В.В. Моделирование резонансных свойств и работы цепи термоэмиссионный реактор-преобразователь — термоэмиссионный вентиль — индуктивная нагрузка космической энергодвигательной установки. *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2013, № 1, с. 68–78.
- [17] Хаяси Т. *Нелинейные колебания в физических системах*. Москва, Мир, 1968, 432 с.
- [18] Лекоргий Ж. *Управляемые электрические вентили и их применение*. Москва, Энергия, 1971, 503 с.

- [19] Ситник Н.Х. *Силовые кремниевые вентиляльные блоки*. Москва, Энергия, 1972, 223 с.
- [20] Lidow A., Strydom J., M. de Rooij, Reusch D. *GaN Transistors for efficient power conversion*. 2nd Edition. Efficient Power Conversion Corporation, El Segundo (California, USA), 2015, p. 268.
- [21] Colino S., Beach R. *Fundamentals of Gallium Nitride power transistors, Application note: AN002*. Efficient Power Conversion Corporation, 2019, p. 4.
- [22] Вишнеvский А.И., Руденко В.С., Платонов А.П. *Силовые ионные и полупроводниковые приборы*. Москва, Высшая школа, 1975, 343 с.
- [23] Каганов И.Л. *Ионные приборы*. Москва, Энергия, 1972, 528 с.
- [24] Онуфриев В.В., Гришин С.Д. Экспериментальное исследование электрической прочности к обратному дуговому пробою термоэмиссионного диода с цезиевым наполнением. *Теплофизика высоких температур*, 1996, т. 34, № 3, с. 482–485.
- [25] Онуфриев В.В., Лошкарев А.И. Зажигание обратного дугового разряда в бариевом термоэмиссионном диоде. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2005, № 1, с. 72–77.

Статья поступила в редакцию 22.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Онуфриева Е.В. Методика расчета электропрочностных и выходных электрических характеристик выпрямительных диодов и сравнения их электрических параметров. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 6. EDN [TQLFWX](#)

Онуфриева Евгения Валерьевна — старший преподаватель кафедры «Техническая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: прямое преобразование энергии, термоэмиссионные преобразователи, приборы плазменной электроэнергетики, космические ядерные энергодвигательные установки, плазменные системы преобразования тока. e-mail: evgeni.bmstu@yandex.ru

Methods to compute electrical strength and output electric characteristics of the rectifying diodes and compare their electric parameters

© E.V. Onufrieva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The main problem in design and development of the rectifying diodes used in the spacecraft power propulsion systems lies in determination of their operating voltage (or the reverse arc breakdown voltage in the locked state), which together with the conducting state current density identifies the electric power characteristics. The paper proposes a method for computing electric strength characteristics in the rectifying diodes. The method combines several mathematical models to compute distribution of the electric field strength, potential and temperature of the cesium atoms in a cathode ion layer in the reverse current mode, study the system resonant properties (obtaining amplitude-frequency and phase-frequency characteristics), as well as studying the electrical strength characteristics of the rectifying diode (determining the diode reverse breakdown voltage). Based on combined introduction of the numerical, semi-empirical and analytical approaches, the diode output characteristics could be computed and justified; they include the breakdown and operating voltages. These characteristics are used as the basis in comparing the diode output electrical power characteristics and justifying a possibility of using the rectifying diodes in a particular current conversion system.

Keywords: *electric rocket engines, spacecraft, rectifying diode, reverse arc breakdown voltage, electric strength characteristics, operating temperature, locked and conducting states*

REFERENCES

- [1] Grishin S.D., Leskov L.V., Kozlov N.P. *Elektricheskie raketnye dvigateli* [Electric rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 272 p.
- [2] Favorsky O.N., Fishgoyt V.V., Yantovsky E.I. *Osnovy teorii kosmicheskikh elektroraketnykh dvigatelnykh ustanovok* [Fundamentals of the theory of space electric rocket propulsion systems]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1970.
- [3] Kvasnikov L.A., Latyshev L.A., Ponomarev-Stepnoy N.N., Sevruk D.D., Tikhonov V.B. *Teoriya i raschet energosilivnykh ustanovok kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Theory and calculation of the spacecraft power systems]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, MAI Publ., 2001, 480 p.
- [4] Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Ivashkin A.B. *Fizicheskie osnovy postroeniya i proektirovaniya vysokotemperaturnykh sistem preobrazovaniya toka kosmicheskikh energodvigatelnykh ustanovok* [Physical foundations of construction and design of high-temperature current conversion systems for the space power propulsion systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2021, 167 p.
- [5] Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Grishin Yu.M., Sidnyaev N.I., Sinyavsky V.V., Ivashkin A.B. O raschete napryazheniya zazhiganiya obratnogo dugovogo razryada v vysokovoltnom plazmennom termoemissionnom diode [On calculating discharge characteristics in a high-voltage plasma thermionic diode in reverse current mode]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2018, no. 4, pp. 108–115.
- [6] Onufrieva E.V., Onufriev V.V. K voprosy o raschete napryazheniya obratnogo dugovogo proboya vysokovoltного termoemissionnogo dioda i ego predelnoy

- udelnoy elektricheskoy moshchnosti [On the issue of calculating the reverse arc breakdown voltage of a high-voltage thermionic diode and its maximum specific electrical power]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2023, no. 2, pp. 46–57.
- [7] Onufriev V.V. Vliyanie energeticheskogo balansa atomov v katodnom sloe na podzhig dugovogo razryada v gazonapolnennom diode [Influence of the atoms' energy balance in the cathode layer on ignition of an arc discharge in the gas-filled diode]. In: *Sbornik trudov 2-y Otrasleyevoy konferentsii "Yadernaya energetika v kosmose. Fizika termoemissionnykh preobrazovateley energii"* (Sukhumi, 28 oktyabrya – 2 noyabrya 1991 g. [Collection of proceedings of the 2nd industry conference "Nuclear power in space. Physics of thermionic energy converters" (Sukhumi, October 28 — November 2, 1991)]. Sukhumi, 1991, pp. 278–287.
- [8] Antsiferov D.A., Onufriev V.V., Onufrieva E.V. Issledovanie elektricheskoy moshchnosti vysokovoltного plazmennogo termoemissionnogo dioda ot teplofizicheskikh parametrov i tipa rabocheho tela [Investigation of the high-voltage plasma thermionic diode electric power dependence on the thermophysical parameters and the type of working fluid]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 9. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-9-2210>
- [9] Kaplan V.B., Martsinovsky A.M., Mustafaev A.S. et al. Impulsnoe upravlenie tokom silnotochnogo nizkovoltного razryada na smesi parov tseziya i bariya [Pulse current control of a high-current low-voltage discharge on the cesium and barium vapors mixture]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 1977, vol. 47, no. 10, pp. 2068–2078.
- [10] Baksht F.G., Kaplan V.B., Kostin A.A. et al. Issledovanie statsionarnogo provodyashchego sostoyaniya setochnogo klyuchevogo elementa [Study of the stationary conducting state of the grid key element]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 1978, vol. 48, no. 11, pp. 2273–2293.
- [11] Kaplan V.B., Makarov A.N., Martsinovsky A.M., Novikov A.B. et al. Nizkovoltnyi vysokotemperaturnyi klyuchevoy element novogo tipa dlya preobrazovaniya postoyannogo toka v peremennyi [Low-voltage high-temperature key element of the new type for converting direct current into the alternating current]. *Zhurnal teoreticheskoy fiziki — Technical Physics*, 1977, vol. 47, no. 2, pp. 274–297.
- [12] Babanin V.I., Kaplan V.B., Kolyshkin V.N. et al. Silynotochnyi klyuchevoy element s Cs-Ba napolneniem v nestatsionarnom rezhime razryada [High-current key element with the Cs–Ba filling in the non-stationary discharge mode]. In: *Vsesoyuz. konf. po termoemissionnomu metodu preobrazovaniya teplovoy energii v elektricheskuyu: Tezisy dokladov* [All-union conf. on the thermoemission method of converting thermal energy into the electrical energy: Abstracts of the reports]. Obninsk, 1979, p. 91.
- [13] Bogomolov I.V., Kuzin G.A., Yurchenko A.A. Eksperimentalnoe issledovanie vysokotemperaturnykh ventiley na bolshie plotnosti toka [Experimental study of the high-temperature valves influence on the high current densities]. In: *Vsesoyuz. konf. po termoemissionnomu metodu preobrazovaniya teplovoy energii v elektricheskuyu* [All-union conf. on the thermoemission method of converting thermal energy into the electrical energy]. Obninsk, 1979, p. 96.
- [14] Baksht F.G., Moyzhes B.Ya. K teorii nizkovoltной dugi v tsezii [On the theory of a low-voltage arc in cesium]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 1965, vol. 35, no. 2, pp. 266–278.
- [15] Dyakonov V.P. "MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6" v matematike i modelirovaniy [“MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6” in mathematics and modeling]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2005, 576 p.

- [16] Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Ivashkin A.B., Sinyavsky V.V. Modelirovanie rezonansnykh svoystv i raboty tsepi termoemissionnyi reactor-preobrazovatel – termoemissionnyi ventil – induktivnaya nagruzka kosmicheskoy energodvigatelnoy ustanovki [Modeling of resonant properties and operation of the thermionic reactor-converter circuit – thermionic valve – inductive load of the space power propulsion system]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika — Thermal Engineering*, 2013, no. 1, pp. 68–78.
- [17] Hayashi Ch. *Nonlinear oscillations in physical systems*. Princeton University Press, 1986 [In Russ.: Khayasi T. Nelineynye kolebaniya v fizicheskikh sistemakh. Moscow, Mir Publ., 1968, 432 p.].
- [18] Lekorghier J. *Upravlyaemye elektricheskie ventili i ikh primenenie* [Controlled electric valves and their application]. Moscow, Energiya Publ., 1971, 503 p. [in Russ.].
- [19] Sitnik N.Kh. *Silovye kremniyye ventilnye bloki* [Power silicon valve blocks]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 223 p.
- [20] Lidow A., Strydom J., M. de Rooij, Reusch D. *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*. Second Edition. Efficient Power Conversion Corporation, El Segundo (California, USA), 2015, p. 268.
- [21] Colino S., Beach R. *Fundamentals of Gallium Nitride Power Transistors, Application Note: AN002*. Efficient Power Conversion Corporation, 2019, p. 4.
- [22] Vishnevsky A.I., Rudenko V.S., Platonov A.P. *Silovye ionnye i poluprovodnikovyye pribory* [Power ion and semiconductor devices]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1975, 343 p.
- [23] Kaganov I.L. *Ionnye pribory* [Ionic devices]. Moscow, Energiya Publ., 1972, 528 p.
- [24] Onufriev V.V., Grishin S.D. Eksperimentalnoe issledovanie elektricheskoy prochnosti k obratnomu dugovomu probuyu termoemissionnogo dioda s tseziyevym napolneniem [Experimental investigation of electric strength to inverse arc breakdown of a thermionic diode with cesium filling]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 1996, vol. 34, no. 3, pp. 482–485.
- [25] Onufriev V.V., Loshkarev A.I. Zazhiganiye obratnogo dugovogo razryada v barievom termoemissionnom diode [Initiation of arcbreak discharge in barium thermal emission diode]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Estestvennyye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Natural Sciences Series*, 2005, no. 1, pp. 72–77.

Onufrieva E.V., Senior Lecturer, Department of Technical Physics, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: direct energy conversion, thermal emission converters, plasma electric power devices, space nuclear power propulsion systems, plasma current conversion systems. e-mail: evgeni.bmstu@yandex.ru