

УДК:621.59

О выборе оптимального температурного режима преобразователя тока космической энергодвигательной установки

Е.В. Онуфриева, И.Н. Алиев, В.В. Онуфриев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Choosing an optimal temperature for the current converter in a space power plant

E.V. Onufrieva, I.N. Aliev, V.V. Onufriev

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.

 e-mail: onufryev@bmstu.ru

i В системах преобразования тока (СПТ) космических энергодвигательных установок (ЭДУ) в качестве перспективных рассматриваются термоэмиссионные вентили плазменной электроэнергетики, использование которых благодаря их высокой рабочей температуре ($T = 700 \dots 1\,000$ К), снижает массу СПТ. Однако рабочие характеристики вентиля существенно зависят от температуры (снижаются с ростом температуры). Падение напряжения в проводящем состоянии сказывается на эффективности, как вентиля, так и СПТ в целом. В этой связи определение оптимальной температуры СПТ, отвечающей максимальной эффективности, является актуальной задачей проектирования новых космических энергодвигательных установок. В статье впервые описано моделирование энергомассовых характеристик СПТ при повышенных температурах — до 1 000 К. Показано, что для космических ЭДУ целесообразно применение высокотемпературных вентилях, что обеспечивает снижение удельной массы СПТ. Определена связь выходного напряжения СПТ от его электрической мощности и температуры. Установлено, что одним из перспективных направлений создания высокотемпературных СПТ является использование в их составе сеточных ключевых элементов и высоковольтных плазменных термоэмиссионных диодов, поскольку они обеспечивают требуемые значения напряжения 1 000...2 500 В при температуре до 1 000 К.

Ключевые слова: система преобразования тока, энергодвигательная установка, вентиль, сеточный ключевой элемент, высоковольтный плазменный термоэмиссионный диод, мощность.

i The perspective energy conversion systems of space power plants are considered to be based on using thermionic plasma valves such as grid key elements, high-voltage plasma thermionic diodes, and high-temperature semiconductor valves. The application of such valves can increase the efficiency of electrical propulsion systems for space due to their high operating temperature ($T = 700 \dots 1\,000$ K). However, the performance of valves decreases with increasing temperature, and the voltage drop in a conductive state affects the effectiveness of the valves and the energy conversion system as a whole. Therefore, the definition of an optimal temperature corresponding to the maximum efficiency of the current converter in a space power plant is very important for designing new space propulsion systems. This paper is the first to model energy and mass characteristics of energy conversion systems at elevated temperatures up to 800 K. It is suggested that electrical propulsion systems for space should use high-temperature valves, which would reduce the specific mass of the current converter. A relation between the output voltage of the current converter and its electrical power and temperature is established. It is found that one of the promising ways of developing high-temperature energy conversion

systems is to use grid key elements and high-voltage plasma thermionic diodes as they provide the required voltage of 1 000 ... 2 500 V at temperatures up to 1 000 K. The results of research can be useful when designing new high-temperature space energy conversion systems for space electric power plants with a capacity of hundreds of kilowatts.

Keywords: current conversion system, power plant, valve, grid key element, high-voltage plasma thermionic diode, power.

Энергодвигательные установки (ЭДУ) космических аппаратов (КА) состоят из следующих систем [1–3]:

- первичный источник энергии (ядерный, солнечный и др.);
- преобразователь первичной энергии в электрическую (в рассматриваемом случае термоэмиссионный реактор-преобразователь (ТРП));
- система преобразования тока (СПТ) или преобразователь тока;
- бортовая кабельная сеть (токовые шины от ТРП до преобразователя тока и шины от преобразователя тока до электроракетной двигательной установки (ЭРДУ)) — силовая часть кабельной сети);
- утилизаторы непреобразованной энергии — холодильники-излучатели (ХИ) (первичного источника энергии, преобразователя тока, бортового отсека и т.д.),
- электроракетные двигатели.

Особенности работы ТРП (высокая рабочая температура — до 2 000 К и наличие ионизирующих излучений [1–3]) налагают жесткие требования на выбор СПТ того или иного типа и условия его функционирования, определяя массогабаритные характеристики всей ЭДУ. Выходное рабочее напряжение перспективных ТРП составляет 120...150 В, а рабочее напряжение маршевой ЭРДУ — 1 000...3 000 В, поэтому преобразователь тока строится по схеме: инвертирование напряжения постоянного тока (выходное ТРП) с помощью управляемых клапанов, повышение амплитуды инвертированного напряжения с помощью трансформатора, выпрямление повышенного напряжения с помощью неуправляемых клапанов.

Преобразователь тока является согласующим узлом между энергетической установкой и ЭРДУ, поэтому его оптимальное напряжение и есть рабочее напряжение ЭРДУ, которое определяется выбором типа электроракетного двигателя и режимом его работы из баллистики перелета.

Цель работы — определение оптимальной температуры элементов и собственно СПТ ЭДУ, что позволяет минимизировать его массу, т. е. найти его минимальную удельную массу $\gamma_{СПТ}$ (суммарную массу его элементов и системы теплоотвода, отнесенную к электрической мощности СПТ).

При этом СПТ должен отвечать условию оптимального рабочего напряжения (при котором его эффективность — КПД максимальна) при указанной температуре.

Поиск оптимальной температуры преобразователя является теплоэлектрической задачей, решение которой позволяет найти параметры клапанов СПТ (энергомассовые и теплофизические), соответствующие минимальной массе преобразователя тока.

Выбор оптимального рабочего напряжения преобразователя тока космической ЭДУ. Масса преобразователя тока складывается из трех составляющих: массы силовой части — клапанов, трансформатора и других коммутирующих устройств, системы управления силовой частью (она с достаточной степенью точности может быть выражена в долях от массы силовой части), массы системы теплоотвода потерь мощности на преобразователе тока.

Масса силовой части преобразователя тока $M_{СПТ}^*$ может быть выражена через удельную массу ее элементов $\gamma_{i\text{эл}}$ (клапанов, трансформаторов, силовых коммутаторов, конденсаторов и т.д.) и их электрическую мощность $N_{i\text{эл}}$:

$$M_{СПТ}^* = \sum_i (\gamma_{i\text{эл}} N_{i\text{эл}}). \quad (1)$$

Поскольку рабочее напряжение клапанов отличается в общем случае от напряжения преобразователя (которое чаще всего больше, чем рабочее напряжение клапана), то количество клапанов должно быть увеличено для обеспечения работоспособности и надежности. Это можно учесть коэффициентом k_u , который определяется отношением выходного напряжения преобразователя $U_{СПТ}$ к рабочему напряжению U_B клапана. В настоящее время большинство полупроводниковых клапанов силового назначения разрабатываются на рабочее напряжение $U_B = 600...2\,000$ В [4, 5].

Если принять

$$k_u = U_{СПТ}/U_B,$$

то выражение для составляющей массы преобразователя электрической энергии ЭДУ (силовой части) преобразуется к следующему виду:

$$M_{\text{СПТ}}^* = \sum_i (\gamma_{i\text{эл}} N_{i\text{эл}} U_{\text{СПТ}} / U_{i\text{в}}), \quad (2)$$

где i — номер соответствующего вентиля в составе СПТ.

Массу системы управления $M_{\text{СУ СПТ}}$ с учетом сделанных выше замечаний можно представить (1) и (2) в следующем виде:

$$M_{\text{СУ СПТ}} = \varphi \sum_i (\gamma_{i\text{эл}} N_{i\text{эл}} U_{\text{СПТ}} / U_{i\text{в}}). \quad (3)$$

Здесь φ — коэффициент. Для традиционных преобразователей тока для диапазона мощностей до 100...200 кВт $\varphi = 0,1 \dots 0,3$ [4, 5].

Третья составляющая массы преобразователя тока ХИ $M_{\text{ХИ СПТ}}$ характеризуется рабочей температурой ХИ, так как от этого параметра существенно зависит площадь излучающей поверхности.

Выразим массу $M_{\text{ХИ СПТ}}$ системы теплоотвода преобразователя тока ЭДУ через функцию отводимой мощности потерь $N_{\text{пот}}$, которая определяется соотношением

$$N_{\text{пот}} = (1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл СПТ}}$$

где $N_{\text{эл СПТ}}$ — электрическая мощность преобразователя. Примем температуру ХИ $T_{\text{ХИ}}$ постоянной, степень черноты поверхности ХИ СПТ считается заданной $\epsilon_{\text{ХИ}}$. Тогда выражение для площади ХИ СПТ примет вид

$$F_{\text{ХИ}} = \frac{N_{\text{пот}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ}} T_{\text{ХИ}}^4} = \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл СПТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ}} T_{\text{ХИ}}^4}. \quad (4)$$

Здесь σ — постоянная Стефана — Больцмана. Отсюда масса системы теплоотвода ХИ

$$M_{\text{ХИ}} = \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл СПТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ}} T_{\text{ХИ}}^4} \gamma_{\text{ХИ}}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{ХИ}}$ — удельная масса единицы площади ХИ, кг/м². Следовательно

$$\gamma_{\text{ХИ СПТ}} = \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}})}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ}} T_{\text{ХИ}}^4} \gamma_{\text{ХИ}}$$

является удельной массой ХИ на единицу отводимой мощности.

Таким образом, массу преобразователя тока ЭДУ можно представить как функцию ее электрической мощности и температуры теплоотвода ХИ (близкой к рабочей температуре СПТ):

$$M_{\text{СПТ}} = (1 + \varphi) \sum_i (\gamma_{i\text{эл}} N_{i\text{эл}} U_{\text{СПТ}} / U_{i\text{в}}) + \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}}) N_{\text{эл СПТ}}}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ}} T_{\text{ХИ}}^4} \gamma_{\text{ХИ}}. \quad (6)$$

Удельную массу СПТ можно определить как функцию удельных энергомассовых характе-

ристик его силовых элементов, КПД и рабочей температуры:

$$\gamma_{\text{СПТ}} = (1 + \varphi) \gamma_{\text{в}} + \frac{(1 - \eta_{\text{СПТ}})}{\sigma \epsilon_{\text{ХИ}} T_{\text{ХИ}}^4} \gamma_{\text{ХИ}}, \quad (7)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — удельная масса силовой части СПТ (вентилей).

Из анализа выражения (7) следует, что рабочая температура преобразователя в явном виде присутствует для ХИ СПТ, но не учтены связи с удельными характеристиками силовых элементов преобразователя.

Следует отметить, что с увеличением температуры потери в преобразователе тока растут, его КПД падает, при этом возрастает удельная масса силовой части преобразователя $\gamma_{\text{в}}$ за счет снижения рабочего напряжения вентиля и соответственно увеличения их количества.

Также переменной составляющей является масса системы теплоотвода $M_{\text{ХИ}}$, которая зависит от площади и физических характеристик материалов, используемых в конструкциях ХИ. Очевидно, что с ростом $T_{\text{ХИ}}$ масса ХИ снижается в силу уменьшения его площади. Однако при этом снижается рабочее напряжение вентиля преобразователя, трансформатора, что обуславливает рост потерь электрической мощности в СПТ и, как следствие, увеличение площади системы теплоотвода. Следовательно, температура СПТ, с одной стороны, снижает его удельную массу, а с другой стороны — ведет к ее увеличению. Поэтому для СПТ ЭДУ существует оптимальное значение рабочей температуры, при которой потери электрической мощности $N_{\text{пот}}$ будут минимальны и, соответственно площадь ее системы теплоотвода $F_{\text{ХИ}}$ минимальна, что обеспечит наименьшую массу $M_{\text{СПТ}}$. При этом выходное напряжение преобразователя (вентилей и других элементов) является оптимальным рабочим напряжением.

Поскольку явная зависимость влияния температуры преобразователя на величину его удельной массы не установлена, используем другой подход. Следует отметить, что для современных (полупроводниковых) вентилях показатель удельной массы в 20–50 раз меньше удельной массы ХИ, что подтверждено данными экспериментальной отработки вентиля и систем теплоотвода. Оптимизация рабочей температуры вентиля преобразователя тока ЭДУ связана с минимизацией потерь мощности $N_{\text{пот}}$ и величиной электрической мощности преобразователя $N_{\text{эл СПТ}}$.

Рассмотрим потери в вентилях преобразователя тока ЭДУ. Потери мощности, отводимые

в окружающее пространство, складываются из потерь в проводящем и запортом состояниях вентиля. Примем, что мощность преобразователя равна мощности некоторого вентиля, его энергетического эквивалента:

$$N_{\text{пот}} = \delta N_1 + \delta N_2 = I_p \delta U_p^* + I_{\text{обр}} U_{\text{обр}} \quad (8a)$$

Здесь $N_{\text{пот}}$ — потери вентиля; δN_1 — потери вентиля в проводящем состоянии, $\delta N_1 = I_p \delta U_p^*$; I_p — рабочий ток вентиля, $I_p = N_p / U_p$; δU_p^* — потери напряжения в проводящем состоянии; δN_2 — потери в запортом состоянии, $\delta N_2 = I_{\text{обр}} U_{\text{обр}}$; $I_{\text{обр}}$ — обратный ток вентиля (ток утечки); $U_{\text{обр}}$ — обратное напряжение (практически равное рабочему напряжению вентиля U_p).

Относительные потери электрической мощности, связанные с КПД или эффективностью, определяются из соотношения

$$\alpha_{\text{пот}} = \frac{N_{\text{пот}}}{N_{\text{эл СПТ}}} = \frac{\delta U_p^*}{U_p} + \frac{I_{\text{обр}} U_p}{N_{\text{эл СПТ}}} \quad (8b)$$

и являются функцией рабочего напряжения. При этом $\alpha_{\text{пот}}$ зависит и от конструктивных и физических характеристик, обуславливающих потери напряжения δU_p^* и обратного тока $I_{\text{обр}}$. Электрическую мощность $N_{\text{эл СПТ}}$ считаем постоянной. Минимум потерь мощности $\alpha_{\text{пот}}(N_{\text{эл СПТ}})$ определяется из условия

$$\frac{d}{dU} \left(\frac{N_{\text{пот}}}{N_{\text{эл СПТ}}} \right) = 0.$$

Продифференцировав (8b), получим выражение, связывающее рабочее напряжение с уровнем электрической мощности:

$$(\alpha_{\text{пот}})'_{U_p} = \frac{d}{dU_p} \left(\frac{N_{\text{пот}}}{N_{\text{эл СПТ}}} \right) = -\frac{\delta U_p^*}{U_p^2} + \frac{I_{\text{обр}}}{N_{\text{эл СПТ}}}.$$

Отсюда находим оптимальное рабочее напряжение $U_{\text{СПТ}}$, соответствующее минимуму потерь мощности преобразователя

$$U_{\text{СПТ}} = \left(\frac{N_{\text{эл СПТ}} \delta U_p^*}{I_{\text{обр}}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

и минимальным относительным потерям

$$\alpha_{\text{пот min}} = \left(\frac{N_{\text{пот}}}{N_{\text{СПТ}}} \right)_{\text{min}} = 2 \sqrt{\frac{I_{\text{обр}} \delta U_p^*}{N_{\text{эл СПТ}}}} = 2 \frac{\delta U_p^*}{U_{p, \text{опт}}},$$

где $U_{p, \text{опт}}$ — оптимальное рабочее напряжение.

Абсолютное минимальное значение потерь электрической мощности

$$N_{\text{пот min}} = 2 \left(I_{\text{обр}} \delta U_p^* N_{\text{эл СПТ}} \right)^{1/2} \quad (10)$$

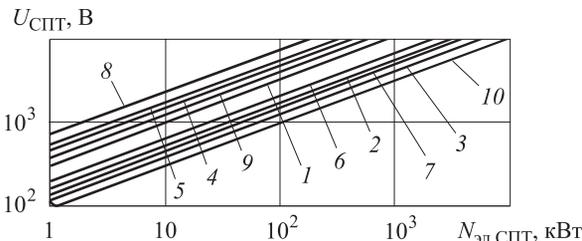


Рис. 1. Зависимость оптимального рабочего напряжения СПТ ЭДУ от электрической мощности: 1 — $I_{\text{обр}} = 0,01 \text{ A}$, $\delta U_p = 1,5 \text{ В}$; 2 — $I_{\text{обр}} = 0,05 \text{ A}$, $\delta U_p = 1,5 \text{ В}$; 3 — $I_{\text{обр}} = 0,10 \text{ A}$, $\delta U_p = 1,5 \text{ В}$; 4 — $I_{\text{обр}} = 0,005 \text{ A}$, $\delta U_p = 1,5 \text{ В}$; 5 — $I_{\text{обр}} = 0,01 \text{ A}$, $\delta U_p = 3 \text{ В}$; 6 — $I_{\text{обр}} = 0,05 \text{ A}$, $\delta U_p = 3 \text{ В}$; 7 — $I_{\text{обр}} = 0,1 \text{ A}$, $\delta U_p = 3 \text{ В}$; 8 — $I_{\text{обр}} = 0,005 \text{ A}$, $\delta U_p = 3 \text{ В}$; 9 — $I_{\text{обр}} = 0,005 \text{ A}$, $\delta U_p = 1,0 \text{ В}$; 10 — $I_{\text{обр}} = 0,1 \text{ A}$, $\delta U_p = 1,0 \text{ В}$

Зависимости оптимального рабочего напряжения преобразователя $U_{\text{СПТ}}$ от электрической мощности приведены на рис. 1. Из анализа рисунка следует, что для каждого уровня электрической мощности существует оптимальное значение рабочего напряжения, при котором потери электрической мощности будут минимальны и, следовательно, величина площади системы теплоотвода и ее масса минимальны.

Выбор оптимальной рабочей температуры преобразователя тока космической ЭДУ. К настоящему времени накоплен опыт практической отработки высокотемпературных вентилях на основе приборов плазменной термоэмиссионной электроэнергетики [6–9], способных работать при температурах до 1 000 К и выдерживать обратные напряжения до 1 500...2 500 В. Как показали результаты исследований, зависимость напряжения пробоя (обратного зажигания) от температуры близка к степенной (гипербола вида $Y = CX^{-\beta}$, где β — показатель степени, близкий к единице; C — некоторая константа). Воспользуемся данным приближением при моделировании температурной зависимости рабочего напряжения перспективного СПТ.

В качестве модельного приближения для перспективных вентилях (полупроводниковых или газоразрядных) примем зависимость рабочего напряжения U_p от температуры T_p в виде

$$U_p = \frac{U_{300}}{T_p^{kb}}, \quad (11)$$

где U_{300} — рабочее напряжение вентиля при $T_0 = 300 \text{ K}$; k — показатель степени, при проведении оценок примем $k = 1,2-1,5$; b — коэффициент, по результатам многочисленных экспериментов $b = 0,001$ [10]. Из выражения (11) следует, что с ростом температуры при передаче одной и той

же электрической мощности ЭДУ вследствие увеличения сопротивления вентилей потери будут возрастать.

Потери мощности в вентилях составят

$$\begin{aligned} N_{\text{пот}} &= b\delta U_p \frac{N_{\text{эл СПТ}} T_p^k}{k_u U_{300}} + k_u I_{\text{обр}} U_p = \\ &= b\delta U_p \frac{N_{\text{эл СПТ}} T_p^k}{k_u U_{300}} + k_u I_{\text{обр}} \frac{U_{300}}{T_p^k b}. \end{aligned}$$

В общем случае падение напряжения в проводящем вентиле зависит от температуры нелинейно: $\delta U_p = f(T)$. При проведении анализа воспользуемся аналитическими зависимостями для $\delta U_p, I_{\text{обр}}$:

$$\delta U_p = \delta U_{p0} (1 + \varphi \Delta t_p); \quad I_{\text{обр}} = I_{\text{обр0}} (1 + \varphi \Delta t_p),$$

где величины δU_{p0} и $I_{\text{обр0}}$ соответствуют нормальным условиям ($T_0 = 300$ К); φ — температурный коэффициент сопротивления перспективного вентиля данного типа; $\Delta t_p = (T - T_0)$ — рабочий температурный нагрев. В этом случае выражение для определения потерь мощности примет вид

$$\begin{aligned} N_{\text{пот}} &= b\delta U_{p0} (1 + \varphi \Delta t_p) \frac{N_{\text{эл СПТ}} T_p^k}{k_u U_{300}} + \\ &+ k_u I_{\text{обр0}} (1 + \varphi \Delta t_p) \frac{U_{300}}{T_p^k b}. \end{aligned} \quad (12)$$

Из формулы (12) можно найти оптимальную температуру вентилей, при которой потери мощности в них минимальны:

$$\begin{aligned} b^2 \frac{\delta U_{p0} N_{\text{эл СПТ}}}{I_{\text{обр0}} U_{300}^2} = \\ = \left\{ T_p^k \frac{k T_p^{k-1} [1 + \varphi (T_p - T_0)] + \varphi T_p^{k-1}}{\varphi - k T_p^{-1} [1 + \varphi (T_p - T_0)]} \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку в выражении (13) в левой части стоит соотношение оптимального рабочего напряжения преобразователя и его выходного напряжения, то с учетом выражения (9) имеем

$$b^2 \frac{U_{\text{СПТ}}^2}{k_u^2 U_{300}^2} = \left\{ T_p^k \frac{k T_p^{k-1} [1 + \varphi (T_p - T_0)] + \varphi T_p^{k-1}}{\varphi - k T_p^{-1} [1 + \varphi (T_p - T_0)]} \right\}^{-1}.$$

Умножив это равенство на величину T_p^2 , получим соотношение

$$b^2 \frac{U_{\text{СПТ}}^2}{k_u^2 U_{300}^2} T_p^2 = \frac{\varphi - k T_p^{-1} [1 + \varphi (T_p - T_0)]}{k T_p^{-1} [1 + \varphi (T_p - T_0)] + \varphi}.$$

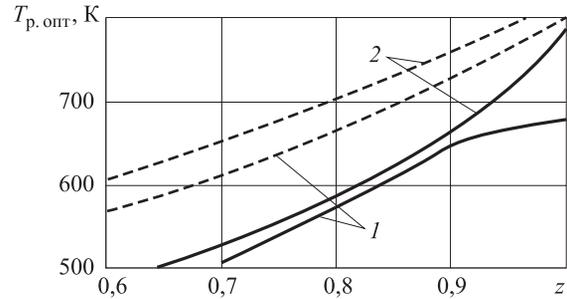


Рис. 2. Оптимальная температура перспективного СПТ:

1 — $k = 1,2$; 2 — $k = 1,5$;
---- — $\varphi = 0,002$; — — — $\varphi = 0,003$

Таким образом, значение оптимального напряжения преобразователя тока зависит от рабочей температуры.

Введем величину

$$Z = U_{\text{СПТ}}/U_p,$$

равную отношению оптимального напряжения преобразователя к его рабочему напряжению U_p . В результате получим уравнение относительно оптимальной температуры преобразователя:

$$T_p \varphi [(1 - z^2) + k(1 + z^2)] = (1 + T_0 \varphi) k (1 + z^2),$$

или в рассматриваемом приближении

$$T_p = \frac{(1 + T_0 \varphi) k (1 + z^2)}{\varphi [(1 - z^2) + k(1 + z^2)]^{1/2}}. \quad (14)$$

Полагая $T_p = T_{p,\text{опт}}$, получим связь между температурой СПТ и его напряжением, выраженным отношением z . Результаты расчета оптимальных температур перспективного СПТ приведены на рис. 2.

Результаты расчетов показывают, что для заданных значений φ, k, z оптимальная температура СПТ ЭДУ составляет 500...850 К, причем она растет с увеличением параметра z (с приближением рабочего напряжения к оптимальному). На основе полученных зависимостей для $T_{p,\text{опт}}$ можно вывести выражение для удельной массы преобразователя тока и напряжения.

Из формулы (7) и зависимости для $\gamma_{\text{СПТ}}$ имеем

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{СПТ}} &= b \frac{U_{\text{СПТ}} T_p^k}{U_{300}} (1 + \vartheta) \gamma_{i_{\text{эл}}} + \\ &+ 2 \frac{\left(b \frac{U_{\text{СПТ}} T_p^k}{U_{300}} + 1 \right) I_{\text{обр0}} (1 + \varphi \Delta t_p) U_{\text{СПТ}}}{\varepsilon_{\text{ХИ}} \sigma T_{\text{ХИ}}^4} \gamma_{\text{ХИ}}. \end{aligned} \quad (15)$$

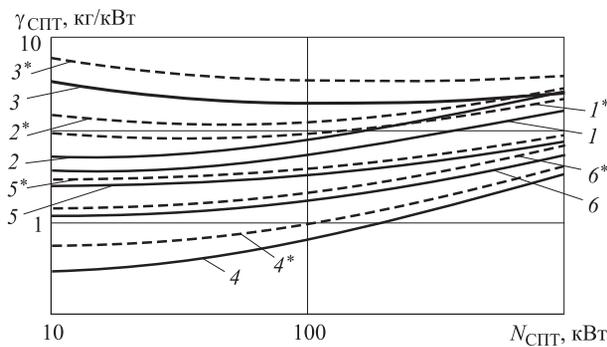


Рис. 3. Зависимость удельной массы СПТ на перспективных вентилях от оптимальной мощности СПТ:

--- — $U_{СПТ} = 1000$ В; — — $U_{СПТ} = 2\ 500$ В; $\gamma_{эл} = 0,1$ кг/кВт;
 $1^* - 6^* - \gamma_{эл} = 0,1$ кг/кВт; 1, $1^* - T_p = 500$ К, 2,
 $2^* - T_p = 900$ К; 3, $3^* - T_p = 130$ К; 4, $4^* - T_p = 500$ К;
 5, $5^* - T_p = 900$ К; 6, $6^* - T_p = 1\ 300$ К

Следует отметить, что с ростом рабочего напряжения преобразователя электрического тока составляющая его массы, характеризующая силовую часть (вентили, трансформатор, конденсаторы), будет увеличиваться. Это обусловлено требованием обеспечения надежности и тем, что рабочее напряжение полупроводниковых вентилях не превышают сотни — тысяч вольт, а рабочее напряжение ЭДУ может достигать десяти и более киловольт. Результаты расчета удельной массы преобразователя космической ЭДУ приведены на рис. 3.

Анализ полученных результатов. Если использовать перспективные полупроводниковые вентили с характеристиками, описываемыми зависимостью (11), то для СПТ мощностью 100 кВт его удельная масса составит 2...15 кг/кВт. Оптимальное значение температуры СПТ составляет 600...900 К, при этом рабочее напряжение перспективного преобразователя должно быть не ниже 2 500 В.

Увеличение паспортного рабочего напряжения вентилях в 2,5 раза (U_{300}) позволяет снизить удельную массу СПТ в 5–7 раз при температурах 700...1 100 К.

Чтобы обеспечить приемлемые значения $\gamma_{СПТ}$, необходимо использовать вентили с напряжением порядка 1 000 В. Полупроводниковые вентили современной и ближайшей перспективной технологий ($U_p \leq 300...500$ В) обеспечивают значительное увеличение удельной массы преобразователя тока до 10...15 кг/кВт.

Использование преобразователей тока с перспективными вентилями ($\gamma_{эл} = 0,2$ кг/кВт) способствует снижению общей массы СПТ до 0,4...5 кг/кВт.

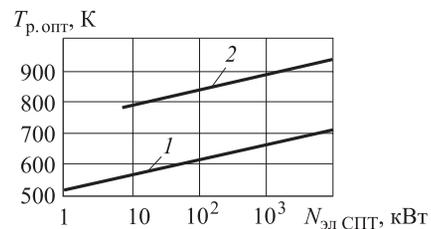


Рис. 4. Зависимость оптимальной рабочей температуры вентилях от электрической мощности СПТ на плазменных вентилях:

1 — цезиевое наполнение; 2 — бариевое наполнение

Уменьшение удельной массы вентилях до 0,1 кг/кВт при одновременном увеличении его рабочего напряжения до 5 кВ позволяет реализовать СПТ со следующей удельной массой:

- $\gamma_{СПТ} = 0,2$ кг/кВт при рабочем напряжении 1...2 кВ;
- $\gamma_{СПТ} = 0,6$ кг/кВт при рабочем напряжении 5 кВ;
- $\gamma_{СПТ} = 1...2$ кг/кВт при рабочем напряжении 10 кВ.

Для реализации перспективных преобразователей тока мощных ЭДУ (электрическая мощность от 150 кВт до 1 МВт) необходимы твердотельные полупроводники с рабочим напряжением не менее 1...5 кВ при рабочих температурах порядка 1 000...1 200 К и удельной массой не более 0,1...0,2 кг/кВт. На сегодняшний день современные технологии твердотельной электроники не обеспечивают заданные параметры. В этой связи становится перспективным применение в мощных космических ЭДУ преобразователя тока, построенного на термоэмиссионных вентилях плазменной электроэнергетики. Отработка элементной базы, выполненной на основе сеточных ключевых элементов [11, 12] и высоковольтных термоэмиссионных диодов [13, 14–18] исследована достаточно подробно как экспериментально, так и теоретически.

В результате комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических исследований высоковольтных плазменных термоэмиссионных диодов были определены температурные режимы систем преобразования тока, выполненных на вентилях плазменной термоэмиссионной электроэнергетики, которые могут быть реализованы в диапазоне электрической мощности 10...10⁴ кВт (рис. 4).

Как свидетельствуют зависимости рабочей температуры вентилях от мощности СПТ (или его рабочего напряжения), представленные на рис. 4, термоэмиссионные вентили с цезиевым или бариевым наполнением могут быть рекомен-

дованы в качестве высокотемпературных силовых элементов перспективных преобразователей тока космических ЭДУ.

Выводы

1. Получены зависимости оптимального напряжения перспективных систем преобразования тока от их электрической мощности.

2. Установлено, что диапазон рабочих температур перспективных преобразователей тока составляет 500...1000 К, что существенно превышает температурный диапазон полупроводниковых вентилях и практически затрудняет или

исключает их использование в составе мощных ЭДУ вследствие значительной удельной массы.

3. Учитывая результаты работ других авторов, показано, что перспективные системы преобразования тока космических ЭДУ могут быть выполнены на термоэмиссионных вентилях плазменной электроэнергетики (с цезиевым или бариевым наполнением).

4. Определены диапазоны удельных масс перспективных систем преобразования тока, построенных на высокотемпературных вентилях, как твердотельных, так и на основе вентилях плазменной термоэмиссионной электроэнергетики.

Литература

- [1] Троицкий С.Р., Быстров П.И., Баранников А.Л. Исследование и экспериментальная отработка высокотемпературных агрегатов систем электроснабжения ядерной энергетической установки с термоэмиссионным реактором-преобразователем. *Сб. ст. Ракетно-космические двигатели и энергетические установки. Системы и средства бортовой энергетики*. Ч. 2, Москва, НИИТП, 1993, с. 106–113.
- [2] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Гришин С.Д., Синявский В.В. Выбор параметров систем преобразования тока в космических ЯЭУ большой мощности. *Атомная энергия*, 2000, т. 89, вып. 1, с. 78–81.
- [3] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Гришин С.Д., Синявский В.В. Проблемы выбора параметров систем преобразования тока в космических ядерных энергетических установках большой мощности. *Космическая энергетика XXI века: Тез. докл. 2-го Международ. семинара*. Обнинск, 2000, с. 68–69.
- [4] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Синявский В.В., Мубояджян С.А. О массоэнергетических преимуществах высокотемпературной электроракетной двигательной установки. *Известия РАН, Энергетика*, 2003, № 3, с. 53–59.
- [5] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Синявский В.В., Мубояджян С.А. О выборе оптимальных параметров силовой кабельной сети электроракетной двигательной установки с низковольтным источником тока. *Известия РАН, Энергетика*, 2003, № 4, с. 71–77.
- [6] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Гришин С.Д., Синявский В.В. Параметрическая оптимизация систем преобразования тока ЯЭРДУ большой мощности (результаты расчетных и экспериментальных исследований). *Космос без оружия — arena мирного сотрудничества в XXI веке: Тез. док. Междунар. конф.* Москва, 2001, с. 141–142.
- [7] Онуфриев В.В., Марахтанов М.К., Мубояджян С.А., Синявский В.В. О выборе оптимального температурного режима космических ядерных электроракетных двигательных установок (ЯЭРДУ). *Научная сессия МИФИ-2001. Тез. докл.* Москва, 2001, т. 8, с. 95–96.
- [8] Онуфриева Е.В., Онуфриев В.В., Яминский В.В. Разработка высоковольтных плазменных термоэмиссионных диодов высокотемпературного преобразователя тока энергодвигательных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011. Спец. вып. *Ионно-плазменные технологии*, с. 70–73.
- [9] Онуфриев В.В., Онуфриева Е.В., Синявский В.В. Высокотемпературные системы преобразования тока перспективных космических энергодвигательных установок. *Известия РАН, Энергетика*, 2009, № 2, с. 137–144.
- [10] Лошкарев А.И., Онуфриев В.В., Синявский В.В. Электроэнергетические характеристики термоэмиссионного высоковольтного диода для космических энергодвигательных установок. *Известия РАН, Энергетика*, 2006, № 1, с. 87–97.
- [11] Kankam M.D., Ribeiro P.F. Energy Loss Analysis of an Integrated Space Power Distribution System. *27th International Energy Conversion Engineering Conference: Proceeding*, San Diego (CA), 1994, vol. 2, pp. 189–194.
- [12] El-Genk M.S., Kaibyshev V.Z., Murray C. Effect of the Grid Aperture on the Operation of the Cs-Ba Tasitron Inverter. *27th International Energy Conversion Engineering Conference: Proceeding*, San Diego (CA), 1994, vol. 2, pp. 343–347.

- [13] Онуфриев В.В., Синявский В.В. Результаты экспериментального исследования высоковольтного термоэмиссионного вентиля с тепловым управлением. *Известия РАН, Энергетика*, 2009, № 1, с. 36–42.
- [14] Onufriyev V.V. The Results of Investigations of High Temperature High Voltage Thermion Diode. *International Energy Conversion Engineering Conference. (IECEC 2000): Proceeding*, Las Vegas (NV), 2000, pp. 290–296.
- [15] Onufriyev V.V. Experimental Investigation of High Temperature High Voltage Thermionic Diode for the Space Power Nuclear Reactor. *Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2001): Proceeding*, Albuquerque (NM), 2001, pp. 1136–1141.
- [16] Онуфриев В.В. Способ выпрямления переменного тока и устройство для его осуществления. Пат. № 2111605 РФ. 1998, бюл. № 14.
- [17] Онуфриев В.В. Способ включения плазменного тиристора и устройство для его осуществления. Пат. № 2144716 РФ. 2000, бюл. № 2.
- [18] Онуфриев В.В., Синявский В.В. Термоэмиссионный вентиль системы выпрямления тока космической энергоустановки. Пат. № 2195740 РФ. 2002, бюл. № 36.

References

- [1] Troitskii S.R., Bystrov P.I., Barannikov A.L. *Issledovanie i eksperimental'naiia otrabotka vysokotemperaturnykh agregatov sistem elektrosnabzheniia iadernoi energeticheskoi ustanovki s termoemissionnym reaktorom-preobrazovatelem* [Research and experimental development of high-temperature units power supply systems of nuclear power plant thermionic converter reactor]. *Raketno-kosmicheskie dvigateli i energeticheskie ustanovki. Sistemy i sredstva bortovoi energetiki* [Space rocket engines and power plants. Systems and facilities onboard energy]. Moscow, NIITP publ., 1993, pt. 2, pp. 106–113.
- [2] Onufriev V.V., Marakhtanov M.K., Grishin S.D., Siniavskii V.V. Vybor parametrov sistem preobrazovaniia toka v kosmicheskikh IaEU bol'shoi moshchnosti [Selection of parameters conversion systems current space NPS high power]. *Atomnaia energiya* [Atomic Energy]. 2000, vol. 89, issue 1, pp. 78–81.
- [3] Onufriev V.V., Marakhtanov M.K., Grishin S.D., Siniavskii V.V. *Problemy vybora parametrov sistem preobrazovaniia toka v kosmicheskikh iadernykh energeticheskikh ustanovkakh bol'shoi moshchnosti* [The problem of choosing the parameters of systems converting the current to space nuclear power plants of high power]. *Kosmicheskaya energetika 21 veka: Tezisy dokladov 2-go Mezhdunarodnogo seminara* [Cosmic Energy XXI century: Abstracts 2nd International Workshop]. Obninsk, 2000, pp. 68–69.
- [4] Onufriev V.V., Marakhtanov M.K., Siniavskii V.V., Muboiadzhian S.A. O massoenergeticheskikh preimushchestvakh vysokotemperaturnoi elektroraketnoi dvigatel'noi ustanovki [The mass-energy advantages of high temperature electrical power propulsion system]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Journal of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2003, no. 3, pp. 53–59.
- [5] Onufriev V.V., Marakhtanov M.K., Siniavskii V.V., Muboiadzhian S.A. O vybere optimal'nykh parametrov silovoi kabel'noi seti elektroraketnoi dvigatel'noi ustanovki s nizkovol'tnym istochnikom toka [Characteristics of high cable network electric propulsion system with low-voltage current source]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Journal of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2003, no. 4, pp. 71–77.
- [6] Onufriev V.V., Marakhtanov M.K., Grishin S.D., Siniavskii V.V. Parametricheskaya optimizatsiia sistem preobrazovaniia toka IaERDU bol'shoi moshchnosti (rezul'taty raschetnykh i eksperimental'nykh issledovaniy) [Parametric optimization of current conversion YAERDU high power (results calculated and experimental studies)]. *Kosmos bez oruzhiia — arena mirnogo sotrudnichestva v 21 veke: Tezisy doklada mezhdunarodnoi konferentsii* [Space without weapons — the arena of peaceful cooperation in the twenty-first century: Proceedings of International Conference]. Moscow, 2001, pp. 141–142.
- [7] Onufriev V.V., Marakhtanov M.K., Muboiadzhian S.A., Siniavskii V.V. O vybere optimal'nogo temperaturnogo rezhima kosmicheskikh iadernykh elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok (IaERDU) [On the choice of optimal temperature space nuclear electric propulsion systems (YAERDU)]. *Nauchnaia sessiia MIFI-2001: Tezisy doklada* [Scientific session of the MIFI-2001: Abstracts]. Moscow, 2001, vol. 8, pp. 95–96.
- [8] Onufrieva E.V., Onufriev V.V., Iaminskii V.V. Razrabotka vysokovol'tnykh plazmennyykh termoemissionnykh diodov vysokotemperaturnogo preobrazovatel'ia toka energodvigatel'nykh

- ustanovok [Development of high plasma thermionic diodes high-current converter power and propulsion]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering]. 2011, special issue «Ionno-plazmennyye tekhnologii», pp. 70–73.
- [9] Onufriev V.V., Onufrieva E.V., Siniavskii V.V. Vysokotemperaturnyye sistemy preobrazovaniya toka perspektivnykh kosmicheskikh energodvigatel'nykh ustanovok [High power conversion system prospective space power and propulsion]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Journal of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2009, no. 4, pp. 137–144.
- [10] Loshkarev A.I., Onufriev V.V., Siniavskii V.V. Elektroenergeticheskiye kharakteristiki termoemissionnogo vysokovol'tnogo dioda dlya kosmicheskikh energodvigatel'nykh ustanovok [Electric-energy characteristics of the thermion high voltage diode for the Space energy-propulsion module]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Journal of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2006, no. 1, pp. 87–97.
- [11] Kankam M.D., Ribeiro P.F. Energy Loss Analysis of an Integrated Space Power Distribution System. *27th International Energy Conversion Engineering Conference: Proceeding*, San Diego (CA), 1994, vol. 2, pp. 189–194.
- [12] El-Genk M.S., Kaibyshev V.Z., Murray C. Effect of the Grid Aperture on the Operation of the Cs-Ba Tasitron Inverter. *27th International Energy Conversion Engineering Conference: Proceeding*, San Diego (CA), 1994, vol. 2, pp. 343–347.
- [13] Onufriev V.V., Siniavskii V.V. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya vysokovol'tnogo termoemissionnogo ventilya s teplovym upravleniem [The results of the experimental investigation of the high voltage thermionic switch with heat control]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Journal of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2009, no. 1, pp. 36–42.
- [14] Onufriyev V.V. The Results of Investigations of High Temperature High Voltage Thermion Diode. *International Energy Conversion Engineering Conference. (IECEC 2000): Proceeding*, Las Vegas (NV), 2000, pp. 290–296.
- [15] Onufriyev V.V. Experimental Investigation of High Temperature High Voltage Thermionic Diode for the Space Power Nuclear Reactor. *Space Technology and Applications International Forum (STAIF-2001): Proceeding*, Albuquerque (NM), 2001, pp. 1136–1141.
- [16] Onufriev V.V. *Sposob vypriamleniya peremennogo toka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of rectifying the AC current and device for its realization]. Patent RF no. 2111605, 1998.
- [17] Onufriev V.V. *Sposob vklucheniya plazmennogo tiristora i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Way to turn the Plasma thyristor and device for its implementation]. Patent RF no. 2144716, 2000.
- [18] Onufriev V.V., Siniavskii V.V. *Termoemissionnyy ventil' sistemy vypriamleniya toka kosmicheskoy energoustanovki* [Thermionic valve system rectification space power plant]. Patent RF no. 2195740, 2002.

Статья поступила в редакцию 14.03.2014

Информация об авторах

ОНУФРИЕВА Евгения Валерьевна (Москва) — ассистент кафедры «Техническая физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

АЛИЕВ Исмаил Новрузович (Москва) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Техническая физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ОНУФРИЕВ Валерий Валентинович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: onufriyev@bmstu.ru).

Information about the authors

ONUFRIEVA Evgeniya Valer'evna (Moscow) — Assistant of «Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

ALIEV Ismail Novruzovich (Moscow) — Dr. Sc. (Phys. Math.), Professor of «Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation).

ONUFRIEV Valeriy Valentinovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Plasma Power Plants» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: onufriyev@bmstu.ru).