

4. Ярыгин В.И., Мелета Е.А., Ионкин В.И. и др. Высокотемпературные кремний-германиевые термоэлектрические генераторы для космических ядерно-энергетических установок. Тезисы докл. на 5-й Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе», Подольск, март 1999.
5. Марколия А.И., Судак Н.М., Сабо Е.П. и др. Конструкторские и технологические проблемы создания высокотемпературных кремний-германиевых термоэлектрических трубчатых модулей для генераторов в системах космических ЯЭУ. — Там же.
6. Швангирадзе Р.Р., Криворучко С.П., Шамба Н.А. Особенности и последствия негомогенности высокотемпературного термоэлектрического сплава кремний—германий. Доклад на VI Межгос. семинаре «Термоэлектрики и их применение» (октябрь 1998 г.), Санкт-Петербург.
7. Веденеев В.П., Залдастанишвили М.И., Криворучко С.П. и др. Сегментированные ветви для интервала температур 300—750 К. — Там же.

УДК 621.431.37:621.59

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОКА В КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Онуфриев В.В., Гришин С.Д., Марахтанов М.К. (МГТУ им. Н.Э. Баумана),
Синяевский В.В. (РКК «Энергия» им. С.П. Королева)

В значительной степени энергомассовые и эксплуатационные характеристики ядерных электроракетных двигательных установок на базе термоэмиссионных реакторов-преобразователей зависят от параметров преобразователя электрической энергии в составе энергоустановки и бортовой кабельной сети. Это обусловлено тем, что по физическим условиям работы реактор является низковольтным источником тока постоянного напряжения [1—3], а маршевая электроракетная двигательная установка требует напряжения для работы на уровне 10^3 — 10^4 В в зависимости от параметров баллистической задачи, так как вследствие электростатического способа ускорения массы удельный импульс $J_{уд}$ пропорционален рабочему (ускоряющему) напряжению электроракетного двигателя. В связи с этим рассматривается минимизация удельной массы ядерной электроракетной двигательной установки за счет выбора рабочих параметров преобразователя тока и кабельной сети: температуры, напряжения, частоты напряжения.

Общеизвестно, что стартовая масса космического аппарата M_0 складывается из следующих составляющих: массы полезной нагрузки M_n , массы конструкции $M_{кон}$, массы рабочего тела, расходуемого в процессе выведения $M_{р.т}$, массы собственно энергодвигательной установки $M_{эду}$ [1—3]:

$$M_0 = M_n + M_{кон} + M_{р.т} + M_{эду}. \quad (1)$$

Конечная характеристическая скорость V_x [3] является в соответствии с уравнением Мещерского функцией удельного импульса электроракетной двигательной установки $J_{уд}$, начальной и конечной массы космического аппарата. Уравнение (1) можно представить в безразмерном виде, разделив почленно все слагаемые на M_0 и введя следующие параметры массы космического аппарата: $(M_n/M_0) = \alpha_n$ — параметр загрузки; $(M_{эду}/M_0) = \nu_{эду}$ — энергомассовое совершенство; $(M_{кон}/M_0) = \beta_{кон}$ — конструктивное совершенство; $(M_{р.т}/M_0) = \tau_{кон}$ — параметр заправки космического аппарата.

Используя развитый подход [1—3], уравнение (1) преобразуется к виду

$$\alpha_n = M_n/M_0 = \exp(-V_x/J_{уд}) - [1 - \exp(-V_x/J_{уд})] [\varphi + \gamma_{эду} J_{уд}^2 / (2t_{тр})],$$

где φ — коэффициент конструкции баков; $t_{тр}$ — время перелета; $\gamma_{эду}$ — удельная масса.

Расчеты показывают, что удельная масса ядерной электроракетной установки существенно влияет на загрузку космического аппарата. Использование ядерной электроракетной двигательной установки удельной массой свыше 50 кг/кВт при времени перелета 1 год позволяет получить параметр загрузки космического аппарата не более 0,4. В межпланетном перелете использование электроракетной двигательной установки с такими характеристиками неприемлемо. В этой связи актуальным становится создание ядерной электроракетной двигательной установки удельной массой 20—30 (30—50) кг/кВт, способной выводить полезные нагрузки с относительной долей 0,5—0,7 при времени перелета 1 год либо решать задачи межпланетных перелетов.

Удельная масса может быть представлена как совокупность суммы эффективной удельной массы электроракетных двигателей $\gamma_{\text{дв}}$, бортовой кабельной сети $\gamma_{\text{бкс}}$, преобразователя тока $\gamma_{\text{п}}$ и собственно реактора-преобразователя $\gamma_{\text{зр}}$. С учетом джоулевых потерь электрической энергии на каждом узле ядерной электроракетной двигательной установки получим выражение для удельной массы

$$\gamma_{\text{зду}} = \gamma_{\text{дв}} + \frac{1}{\eta_{\text{т}}\eta_{\text{эл}}} \gamma_{\text{ксл}} + \frac{1}{\eta_{\text{т}}\eta_{\text{эл}}\eta_{\text{ксл}}} \gamma_{\text{п}} + \frac{1}{\eta_{\text{т}}\eta_{\text{эл}}\eta_{\text{ксл}}\eta_{\text{п}}} \gamma_{\text{кск2}} + \frac{1}{\eta_{\text{т}}\eta_{\text{эл}}\eta_{\text{ксл}}\eta_{\text{п}}\eta_{\text{кск2}}} \gamma_{\text{зр}}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{т}}$ — тепловой к.п.д. электроракетного двигателя; $\eta_{\text{эл}}$ — его электрический к.п.д.; $\eta_{\text{ксл}}$, $\eta_{\text{кск2}}$ — к.п.д. шин бортовой кабельной сети; $\eta_{\text{п}}$ — к.п.д. преобразователя тока, которое показывает, что эффективность каждого последующего звена цепи передачи электрической мощности в ядерной электроракетной двигательной установке влияет на удельную массу предыдущего звена (компенсация потерь мощности). В этой связи выбор оптимальных рабочих параметров, обеспечивающих минимальную удельную массу электроракетной двигательной установки, является одной из задач формирования ее технического облика.

Рассмотрим подробнее структуру удельной массы преобразователя тока.

Масса силовой части преобразователя $M_{\text{з}}$ может быть выражена через удельную массу элементов $\gamma_{\text{з}}$ (вентилей, трансформаторов, коммутаторов, конденсаторов и т.д.) и их электрическую мощность: $M_{\text{з}}(N_{\text{из}}) = \Sigma(\gamma_{\text{з}}N_{\text{из}})$. Так как рабочее напряжение вентиля отличается в общем случае от напряжения преобразователя, их число можно учесть коэффициентом $k_{\text{У}}$, который определяется отношением выходного напряжения преобразователя к рабочему вентилю. Масса системы управления $M_{\text{с.у}}$ может быть представлена как $M_{\text{с.у}} = \theta \Sigma(\gamma_{\text{з}}N_{\text{из}})$, где θ — коэффициент, который по многочисленным экспериментальным и проектным данным равен 0,1—0,3 для диапазона мощностей до 100—200 кВт [4, 5].

Третья составляющая массы преобразователя тока $M_{\text{х}}$ зависит от рабочей температуры холодильника-излучателя $T_{\text{х}}$ и отводимой мощности потерь: $N_{\text{пот}} = (1 - \eta_{\text{п}})N_{\text{п}}$. Таким образом, удельную массу преобразователя тока ядерной электроракетной двигательной установки можно выразить как функцию энергомассовых характеристик его элементов и рабочей температуры

$$\gamma_{\text{п}} = (1 + \theta)\Sigma(k_{\text{У}}\gamma_{\text{з}}) + \frac{(1 - \eta_{\text{п}})}{\epsilon_{\text{х}}\sigma T_{\text{х}}^4} \gamma_{\text{х}},$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана; $\gamma_{\text{х}}$ — удельная масса единицы площади холодильника-излучателя.

Анализ температурного режима работы преобразователя тока ядерной электроракетной двигательной установки и его влияния на $\gamma_{\text{зду}}$ показал перспективность применения преобразователей тока на высокотемпературных элементах (с $T_{\text{р}} \sim 600$ —900 К), что дает выигрыш по полезной массе космического аппарата. Так, для пре-

образователей тока на «легких» вентилях (0,1 кг/кВт) при увеличении их рабочей температуры с 300 до 1000 К имеет место снижение его удельной массы на 50—70 %. С ростом удельной массы преобразователя тока этот эффект менее выражен (выигрыш в массе не более 10%), что обусловлено относительно малой долей массы холодильника-излучателя. Расчеты показали, что желательно иметь k_U не более 2.

Еще одним фактором, влияющим на удельную массу электроракетной двигательной установки, является масса бортовой кабельной сети. Положим, что шины выполнены из одного материала, обладают одинаковыми физическими характеристиками на обоих участках цепи реактор—преобразователь тока и преобразователь тока—электроракетный двигатель и $\eta_{к1} = \eta_{к2} = \eta_{кc}$. Мощность потерь оценивается как сумма потерь на участках реактор—преобразователь тока и преобразователь тока—электроракетный двигатель и определяется протекающим током в шинах $I_{ш}$ и электрическим сопротивлением шин $R_{ш}$, которое выражается через их удельное электрическое сопротивление ρ_0 , температурный коэффициент электрического сопротивления α , температуру $T_{ш}$, площадь сечения S и длину шины L . Мощность потерь отводится излучением, при этом площадь отвода тепла определяется как $F_{х.кc} = \Pi L$, где Π — периметр сечения шины, связанный с площадью; $\beta = S/\Pi$ или $F_{х.кc} = SL/\beta$. В результате получим выражение для удельной массы бортовой кабельной сети:

$$\gamma_{бкc} = \frac{1}{\eta_r \eta_{эл}} \left(1 + \frac{1}{\eta_{кc} \eta_n} \right) \frac{\delta_{кc} L}{U_{р.кc} \eta_{кc} \left(\epsilon_{ш} \sigma T_{ш}^4 / \beta \rho_0 (1 + \alpha \Delta t_{ш}) \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

где $\Delta t_{ш} = T_{ш} - T_0$; T_0 — начальная температура шины; $U_{р.кc}$ — рабочее напряжение на бортовой кабельной сети; $\delta_{кc}$ — плотность материала шины.

Выражение (3) показывает, что удельная масса шин кабельной сети ядерной электроракетной двигательной установки является функцией теплофизических и электрофизических характеристик материала, из которого она изготовлена. Она также зависит от рабочей температуры шины и рабочего напряжения. Полученный результат свидетельствует о том, что высоковольтные части бортовой кабельной сети, как и высокотемпературные, будут «легче» низковольтных.

Отметим, при выборе температурного режима шин кабельной сети необходимо внимательно подходить к выбору материала с учетом его физических характеристик: низкотемпературные шины целесообразно выполнять из легких металлов или сплавов, высокотемпературные — из материалов, удовлетворяющих оптимальному $K = T_{ш}^4 / [\beta \rho_0 (1 + \alpha \Delta T_{ш})]$.

Снижение $\gamma_{кc}$ при повышенной температуре может быть обеспечено построением комбинированных шин: высокотемпературная оболочка из Mo, Nb, Ta, заполненная жидким металлом — Li, Na, K.

Отметим, что увеличение рабочей температуры шин бортовой кабельной сети с 300 до 900 К позволяет снизить их удельную массу на 20%. Особенно это важно в случае сильноточных шин, когда абсолютная масса кабельной сети играет роль в массе ядерной электроракетной двигательной установки.

Следующей характеристикой, влияющей на удельную массу кабельной сети и преобразователя тока, является частота рабочего напряжения. С ростом частоты напряжения потери электрической энергии в шинах кабельной сети растут в связи с проявлением поверхностных эффектов. Это может быть учтено коэффициентом потерь k_d , который в общем случае является функцией частоты [6]. Увеличение массы шин

кабельной сети пропорционально $f(k_d)$. Кроме того, повышение частоты напряжения ядерной электроракетной двигательной установки ведет к снижению массы электротехнических элементов преобразователя тока (трансформаторов, индуктивных элементов, емкостей) — коэффициент $f_1(k_d)$.

Влияние частоты рабочего напряжения ядерной электроракетной двигательной установки на ее удельную массу выражается в том, что с ее ростом потери в шинах кабельной сети увеличиваются в 1,2—2,5 раза при увеличении f_p от 0,1 до 100 кГц.

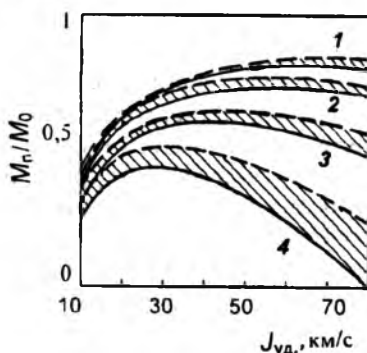
Расчеты показали, что оптимальный диапазон рабочих частот составляет 1,5—4 кГц.

В итоге получим обобщенную зависимость для удельной массы ядерной электроракетной двигательной установки, являющуюся функцией как физических характеристик ее систем, так и условий их функционирования:

$$\gamma_{\text{эду}} = \gamma_{\text{дв}} + \frac{f(k_d)}{\eta_T \eta_{\text{эл}}} \left(1 + \frac{1}{\eta_{\text{кв}} \eta_{\text{п}}} \right) \frac{\delta_{\text{кв}} L}{U_{\text{р.кв}} \eta_{\text{кв}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{ш}} \sigma T_{\text{ш}}^4}{\beta \rho_0 (1 + \alpha \Delta t_{\text{ш}})} \right)^{1/2} +} + f_1(k_d) (1 + \theta) \Sigma(k_U \gamma_{\text{э}}) + \frac{(1 - \eta_{\text{п}})}{\varepsilon_{\text{х}} \sigma T_{\text{х}}^4} \gamma_{\text{х}} + \frac{1}{\eta_T \eta_{\text{эл}} \eta_{\text{кв}}^2 \eta_{\text{п}}} \gamma_{\text{эу}}. \quad (4)$$

Расчеты параметра загрузки космического аппарата $\alpha_{\text{п}}$, выполненные по выражению (2) с учетом зависимости (4), показывают, что увеличение рабочей температуры преобразователя тока и шин бортовой кабельной сети ядерной электроракетной двигательной установки с 300 до 500 К и частоты питающего напряжения до 1,5—4 кГц приводит к снижению ее удельной массы почти на 15—20%, при повышении рабочей температуры до 900 К уменьшение ее удельной массы может достигать 65% первоначальной при 300 К (см. рисунок). Причем снижение тем больше, чем больше удельная масса элементов, входящих в ядерную электроракетную двигательную установку.

Отметим, что массовая доля шин кабельной сети и преобразователя тока для «тяжелых» ядерных электроракетных двигательных установок снижается при увеличении температуры с 300 до 900 К с 83 до 51% и с 77 до 33%.



Зависимость параметра загрузки космического аппарата от удельного импульса ядерной электроракетной установки при $t_{\text{тр}} = 400$ сут, $\varphi = 0,1$, $V_{\text{х}} = 8000$ м/с, $\gamma_{\text{эду}}$, равной 10 (1), 20 (2), 50 (3), 100 кг/кВт (4), $T_{\text{р}} = 900$ (— — —) и 300 К (—)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975.
2. Грязнов Г.М. Космическое атомное энергомашиностроение — новое направление в энергетике будущего. — Известия АН СССР, сер. «Энергетика и транспорт», 1991, № 6, с. 24—33.
3. Агеев В.П., Быстров П.И., Масленников А.А. и др. Электроядерный буксир в программе перспективных задач освоения космоса. — Проблемы авиац. и космич. техники, 1994, № 3, с. 36—39.
4. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе. М.: Высшая школа, 1972.
5. Космические двигатели: состояние и перспективы. Под ред. Л. Кейвни. Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
6. Бела-Белов А.М. Аппараты низкого напряжения повышенной частоты. М.: Энергия, 1968, с. 24—28.