

УДК 537.581/585

Об оптимизации массоэнергетических и электрических характеристик бортовой кабельной сети мощной энергодвигательной установки с низкпотенциальным источником энергии

Онуфриев Валерий Валентинович

onufryev@bmstu.ru

SPIN-код: 7601-5159

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Важным фактором, влияющим на величину удельной массы энергодвигательной установки (ЭДУ) является бортовая кабельная сеть (БКС). Величина эффективной удельной массы БКС с учетом потерь электрической энергии определяется характеристиками двух участков цепи: «термоэмиссионный реактор-преобразователь (ТРП) — преобразователь тока» и «преобразователь тока — ЭРД». В работе представлена массо-энергетическая модель расчета и оптимизации выходных характеристик БКС, позволяющая определить оптимальную длину, геометрию и электрические параметры. Предложены варианты построения высокотемпературной БКС.

Ключевые слова: бортовая кабельная сеть, оптимальная температура, плотность тока, удельная масса, длина шины, материал шины

Введение. Мощные ЭДУ космических аппаратов включают в себя следующие системы [1–3]: первичный источник энергии (ядерный), преобразователь первичной энергии в электрическую энергию — ТРП, преобразователь тока, БКС, холодильники-излучатели, ЭРД. Шина находится в тепловом равновесии (потери электрической мощности отводятся в окружающее пространство излучением с учетом доли излучающей поверхности). В качестве исходной методики расчета была взята методика определения оптимальной плотности тока в силовых шинах космических ЭУ на основе ТРП.

Методы и материалы; результаты. На основе указанного подхода получена параметрическая зависимость для расчета удельной массы шины БКС [4, 5]:

$$\gamma_{\text{КС}} = \frac{\delta_{\text{КС}} L}{U_{\text{р.КС}} \eta_{\text{КС}} \left(\frac{\varepsilon_{\text{КС}} \sigma T_{\text{ш}}^4}{\beta \rho_0 (1 + \alpha \Delta t_{\text{ш}})} \right)^{1/2}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{КС}}$ — физическая плотность материала; L — длина; $\varepsilon_{\text{КС}}$ — степень черноты излучающей поверхности; $T_{\text{ш}}$ — температура; β — фактор геометрии сечения; ρ_0 — удельное электрическое сопротивление материала; α — температурный коэффициент сопротивления; $\Delta t_{\text{ш}} = T_{\text{ш}} - T_0$, $T_0 = 300$ К; $U_{\text{р.КС}}$ — рабочее напряжение БКС; $\eta_{\text{КС}}$ — КПД передачи энергии БКС; σ — постоянная Стефана – Больцмана.

Получено уравнение относительно оптимальной температуры $T_{\text{опт}}$ шин БКС:

$$T_{opt}^8 + 0,8 \left(\frac{1}{\alpha} - T_0 \right) T_{opt}^7 - \left(0,6 \frac{\delta_{КС} \beta}{\gamma_{ЭУ} \epsilon_{КС} \sigma} + 1,2 T_0^4 + 0,8 \frac{T_0^3}{\alpha} \right) T_{opt}^4 - \\ - 0,8 \left(T_0^5 - \frac{\delta_{КС} \beta}{\gamma_{ЭУ} \epsilon_{КС} \alpha \sigma} + \frac{\delta_{КС} \beta}{\gamma_{ЭУ} \epsilon_{КС} \sigma} T_0 \right) T_{opt}^3 + 0,2 \frac{\delta_{КС} \beta}{\gamma_{ЭУ} \epsilon_{КС} \sigma} T_0^4 + 0,2 T_0^8 = 0, \quad (2)$$

где $\gamma_{ЭУ}$ — удельная масса энергоустановки.

Выражение (2) показывает, что оптимальная температура шины не зависит от величины передаваемой электрической мощности по ней (тока и напряжения), а является только функцией лишь удельных энергомассовых характеристик ЭУ $\gamma_{ЭУ}$ и физических свойств материала (температурного коэффициента сопротивления, плотности и приведенной степени черноты, геометрии шины, расположения в пространстве), начальной температуры T_0 . Проведено исследование для обоснования материала шины, показано: при одинаковых β , $\gamma_{ЭУ}$, $\epsilon_{КС}$ оптимальные температуры для шин из двух различных материалов относятся как корень четвертой степени из отношения плотностей их материалов. Результаты исследования приведены в таблице.

Результаты исследования

Материал шины	$\delta_{КС}$, кг/м ³	j_{opt} , А/мм ²	T_{opt} , К	$M_{уд}$, г/(А м)	$M_{уд,ш}/M_{удLi}$
Li	530	0,64	464	1,66	1,00
Al	2680	2,02	615	2,08	1,27
Be	1800	1,22	510	2,10	1,27
Cu	8920	4,48	835	3,22	1,33
Co	8900	5,94	1050	3,84	2,32
Mo	10200	2,37	825	6,43	3,88
Nb	8570	1,77	863	8,59	5,20

Проведенное исследование позволило сделать следующие рекомендации для проектирования БКС:

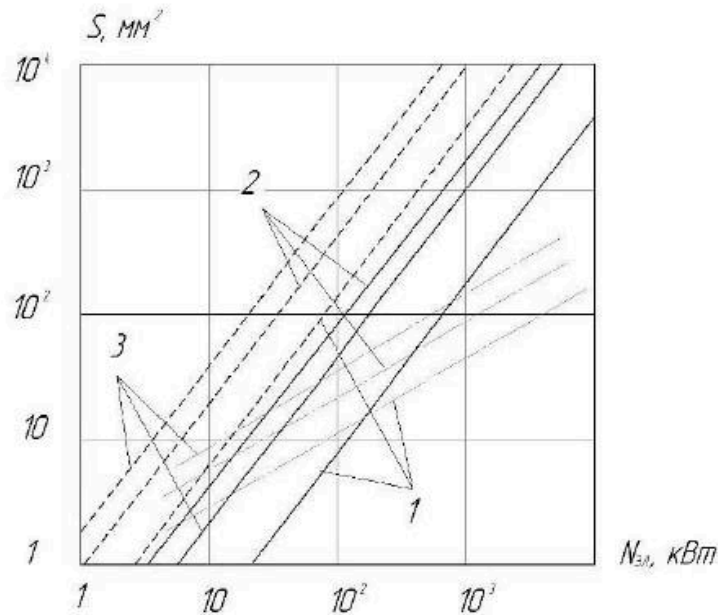
- низкотемпературные шины целесообразно выполнять из легких материалов (Al, Be) с термоизоляцией от высокотемпературных агрегатов КА;
- высокотемпературные твердотельные шины (500–900 К) изготавливать из (Cu, Co, Mo, Nb, Ni, нержавеющие стали);
- высокотемпературные шины ($T_{ш} > 1100$ К) целесообразно выполнять комбинированными (труба из Nb, Mo с жидкометаллическим наполнением — Li).

Для определения геометрических характеристик шин использовалось уравнение для оптимальной температуры шины и геометрического параметра β . В результате получены зависимости оптимальной геометрии сечения в зависимости от передаваемой мощности. Формула для оптимального сечения

шины (3) позволяет провести параметрическое исследование в зависимости от условий работы и материала:

$$S_{opt} = \frac{N_{эл}}{U_{р.КС}} \left(\frac{\rho_0 (1 + \alpha \Delta t_{ш}) \gamma_{эу} f(T_0, T_{opt})}{T_{opt}^4 \delta_{КС} f_{хи}} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $f_{хи}$ — коэффициент доли излучающей поверхности шины БКС; $f(T_0, T_{opt})$ — функционал от параметра β , полученный из выражения (2).



Зависимость поперечного сечения токовой шины ЭДУ от величины электрической мощности и рабочего напряжения:

$T_0 = 300$ К; материал — медь; $f_{хи} = 0,4$; 1 — $\gamma_{эу} = 10$ кг/кВт; 2 — $\gamma_{эу} = 20$ кг/кВт; 3 — $\gamma_{эу} = 50$ кг/кВт;
 — — — $U_{р.КС} = 1$ кВ; - - - - - $U_{р.КС} = 100$ В; - * - * - — оптимальное рабочее напряжение

Заключение. Чтобы транспортировать электрическую энергию к ЭРДУ с КПД не ниже 0,9 рабочее напряжение БКС должно составлять не менее 1 кВ для шин из бериллия, меди, молибдена, вольфрама при $T_{ш} = 500-900$ К. Увеличение $T_{ш}$ до 1300 К требует использования рабочего напряжения до 10 кВ. При этом увеличение длины БКС прямо пропорционально величине рабочего напряжения $U_{р.КС}$. Комбинированные шины БКС (жидкий металл с высокотемпературной оболочкой) обладают массовыми характеристиками в 3–5 раз меньшими по сравнению с твердотельными.

Список источников

- [1] Андреев П.В., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е. Принципы построения и основные характеристики космических термоэмиссионных ЯЭУ с тепловым реактором длительного ресурса. *Атомная энергия*, 1991, т. 70, № 4, с. 217–220.
- [2] Андреев П.В., Жаботинский Е.Е., Никонов А.М. Перспективы использования термоэмиссионных ЯЭУ для межорбитальных перелетов космических аппаратов в околоземном пространстве. *Атомная энергия*, 1992, т. 73, № 5, с. 346–350.

- [3] Киселев Г.В., Чувило И.В., Шведов О.В.. Использование электроядерных установок в перспективной ядерной энергетике. *Атомная энергия*, 1994, т. 77, № 3, с. 167–174.
- [4] Онуфриева Е.В., Синявский В.В., Онуфриев В.В. Высокотемпературные системы преобразования тока перспективных космических энергодвигательных установок. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 4, с. 137–144.
- [5] 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.