

## РАЗРАБОТКА НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В.Е. Овчаренко<sup>1</sup>, Е.В. Токарева<sup>2</sup>, И.В. Гурин<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский технологический институт приборостроения,  
Харьков, Украина*

*E-mail: nitip@kharkov.ukrtel.net;*

<sup>2</sup>*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина*

*E-mail: olena.tokarieva@nure.ua;*

<sup>3</sup>*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*

*E-mail: igor@kipt.kharkov.ua*

Предложена модель системы регулирования температуры электротермического двигателя, основанная на изменении электрических параметров углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) от температуры. Представлены результаты экспериментальных исследований и даны рекомендации по разработке и расчету параметров нагревательного элемента из УУКМ. Приведены данные стендовых испытаний, подтверждающие работоспособность предложенной системы регулирования температурно-мощностных параметров теплового узла электротермического двигателя.

Современный этап создания малых космических аппаратов (МКА), запускаемых ракетными средствами выведения на орбиту, предполагает решение широкого круга научных и прикладных задач. Для точного позиционирования МКА в его состав включают корректирующие электротермические двигатели различных конструкций, которые используют в качестве рабочего тела окись азота, аммиак и др.

В процессе создания электротермических двигателей (ЭТД) возникает необходимость создания нагревательного элемента, обладающего высокими термическими характеристиками, длительным сроком эксплуатации, малой массой, химической стойкостью к агрессивным средам и быстрым временем разогрева.

В ЭТД преобразование электрической энергии в тепловую происходит с помощью резистивного нагревателя. Работа нагревателя протекает в тяжелых условиях, зачастую при предельно допустимых температурах для материалов, из которых изготовлена тепловая камера двигателя. Срок службы нагревателя определяет время работы всего ЭТД, поэтому его увеличение является важной задачей обеспечения надежности всей двигательной установки. Факторами, обуславливающими срок службы резистивного нагревателя, являются прежде всего его стойкость к высокой рабочей температуре (до 1500 °С) при нескольких тысячах циклах включения, стабильность электрического сопротивления, стойкость к термоударам, механическая прочность, а также стойкость к радиационному излучению.

Одним из перспективных материалов для изготовления критических элементов электротермического двигателя является углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ).

УУКМ обладает уникальным комплексом технических характеристик, которые отличают его от современных конструкционных материалов. К достоинствам УУКМ следует отнести их низкий удельный вес (1,35...1,85 г/см<sup>3</sup>), высокие механические свойства в широком диапазоне температур (-100...+2200 °С), высокую стойкость к термическим ударам, способность сохранять свою форму и геометрические размеры при термоциклировании. При этом характер зависимости механических свойств от температуры показывает, что при нормальной температуре прочность УУКМ может быть даже меньше, чем при высоких температурах [1]. Температурный коэффициент линейного расширения УУКМ находится на уровне (0,5...3)·10<sup>-6</sup> [1, 2], удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С составляет 36...40 (Ом·мм<sup>2</sup>)/м и с ростом температуры снижается [1]. УУКМ обладает постоянством электрических свойств во времени, может работать в прерывистом токовом режиме, химически стоек к кислотной, щелочной и аммиачной средам.

Применение резистивных нагревателей из УУКМ является перспективным для различных устройств, работающих в диапазоне температур 900...2200 °С в вакууме или защитной атмосфере [1].

В данной работе приведена методика расчета конструкции резистивного нагревателя из УУКМ и разработана структурная схема системы терморегулирования ЭТД.

Учитывая сравнительно небольшое удельное электрическое сопротивление УУКМ и ограничения по габаритным размерам ЭТД, предложен эскиз конструкции резистивного нагревателя, выполненного в виде спирали, с двух сторон

которой предусмотрены зоны для токовыводов (рис. 1).

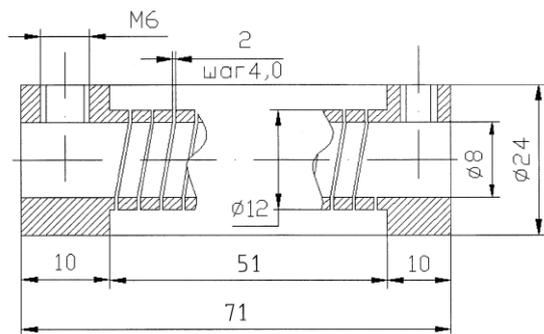


Рис. 1. Эскиз конструкции нагревателя

Исходя из конструктивных требований к ЭТД, ширина проводника резистивного элемента нагревателя должна быть не менее 2 мм, шаг спирали – 4 мм, наружный диаметр спирали – 12 мм, внутренний – 8 мм.

Важнейшей расчетной характеристикой при проектировании нагревателя является поверхностная мощность, выделяемая с единицы поверхности нагревателя ( $P_{нов}$ ), которая определяет его температуру и работоспособность.

Обычно поверхностную мощность рассчитываемого нагревателя сравнивают с поверхностной мощностью идеального нагревателя. Под идеальным подразумевается такой нагреватель, который образует с теплообменником две сплошные параллельные бесконечные плоскости, при условии, что передача тепла происходит в результате излучения. Для такого нагревателя уравнение теплопередачи следующее [3]:

$$P_{нов} = c_0 \varepsilon_{np} \left( \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \right), \quad (1)$$

где  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon_{np}$  – приведенный коэффициент черноты системы нагреватель–теплообменник;  $T_n$  – температура нагревателя;  $T_m$  – температура теплообменника.

Имеем приведенный коэффициент черноты в данном случае:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_n} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_m$  – коэффициент черноты материала теплообменника;  $\varepsilon_n$  – коэффициент черноты материала нагревателя.

Можно принять, что реальный нагреватель излучает на теплообменник тепло не полной своей поверхностью, а только некоторой условной эффективной поверхностью. Тогда поверхностная мощность реального нагревателя будет отличаться

от поверхностной мощности идеального нагревателя [3]:

$$P_{нов} = P_{ид} \alpha_{эф} \alpha_2 \alpha_c \alpha_p, \quad (3)$$

где  $P_{ид}$  – поверхностная мощность идеального нагревателя;  $\alpha_{эф}$  – коэффициент эффективности излучения нагревателя;  $\alpha_2$  – коэффициент шага;  $\alpha_c$  – коэффициент, учитывающий зависимость  $P_{д}$  от приведенного коэффициента излучения  $c_{np}$ ;  $\alpha_p$  – коэффициент, учитывающий влияние размеров теплообменника.

По предельно допустимой поверхностной мощности определяется конструкция резистивного нагревателя.

В качестве исходных данных для расчета размеров резистивного нагревателя задаются напряжение и допустимая мощность источника постоянного тока  $U = 24$  В,  $P_{дон} = 240$  Вт; удельное электрическое сопротивление УУКМ 40 ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ); максимальная температура нагревателя  $T_{макс} = 1200$  °С.

Расчетное сопротивление нагревателя при токе 10 А составляет 2,4 Ом. Согласно проведенным исследованиям сопротивление нагревателя при нагреве до температуры 1200 °С изменяется приблизительно в 1,4 раза. Примем сопротивление нагревателя при температуре 20 °С равным 4 Ом.

На рис. 2 приведен экспериментально полученный график зависимости сопротивления нагревателя от температуры.

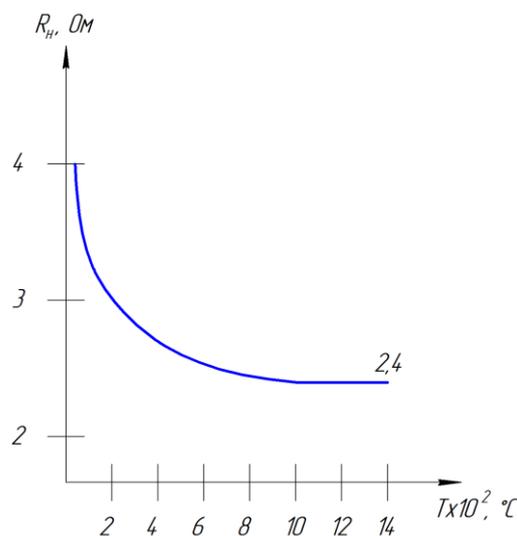


Рис. 2. График зависимости сопротивления резистивного нагревателя от температуры

Далее определим длину резистивного элемента нагревателя:

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{4 \cdot 4}{40} = 0,4 \text{ м}, \quad (4)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление резистивного элемента нагревателя, Ом;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление УУКМ, ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ );  $S$  – пло-

щадь поперечного сечения резистивного элемента нагревателя, мм<sup>2</sup>.

Исходя из диаметра спирали, длина одного витка спирали (по средней линии) составляет 31,4 мм, тогда количество витков на спирали составит приблизительно 12,6, длина резистивной спиральной части нагревателя – 51 мм.

Выделенная на нагревателе энергия передается теплообменнику излучением с поверхности нагревателя  $S$ . Поверхностная мощность нагревателя, выделяемая с единицы поверхности нагревателя, составляет

$$P_{нов} = \frac{P_{дон}}{l \cdot 2(a+b)} = \frac{240}{400 \cdot 8} = 0,075 \text{ Вт/мм}^2, \quad (5)$$

где  $a, b$  – ширина и толщина витка спирали.

Важной задачей при создании ЭТД является обеспечение стабильности тяги, которая зависит от многих параметров, прежде всего, от обеспечения заданной температуры нагрева рабочего тела в камере двигателя в процессе работы.

Рассмотрим модель системы регулирования температуры в тепловой камере ЭТД.

Существующие системы регулирования температуры включают различные функциональные элементы и, как правило, обязательное наличие обратной связи по управляемому параметру объекта.

Для измерения температуры внутри тепловой камеры двигателя обычно применяют контактные методы измерения с помощью резистивных или термоэлектрических датчиков, установленных внутри объекта в определенном месте. Недостатком такого метода является наличие в зоне измерения датчика, у которого рабочий диапазон должен быть гарантировано выше измеряемой температуры объекта. Кроме того, датчик неизбежно имеет некую тепловую инерционность, а размещение такого датчика создает определенные технологические трудности, усложняет конструкцию двигателя и снижает надежность всей системы [4].

В данной работе в качестве элемента обратной связи предложено использовать интегральную оценку температуры в камере косвенным методом, который основан на изменении сопротивления УУКМ с ростом температуры и фактически заключается в измерении силы электрического тока, протекающего через нагреватель, который находится в условиях термодинамического равновесия с объектом.

Таким образом, нагреватель рассматривается как некоторая система, подверженная различным тепловым воздействиям, которые определяют процесс теплопереноса и характер изменения температуры внутри камеры и в зоне расположения нагревателя. Важнейшими из них являются: тепловое воздействие рабочего тела; теплообмен излучением между нагревателем и газообразной средой; теплопередача между теплообменником и отдельными конструктивными элементами в камере двигателя; влияние внешних тепловых источников.

Величина протекающего рабочего тока в резистивном нагревателе пропорциональна его

электрическому сопротивлению, которое соответствует реальной температуре в тепловой камере и заранее определено экспериментально. На рис. 3 приведена зависимость потребляемого тока от температуры нагревателя.

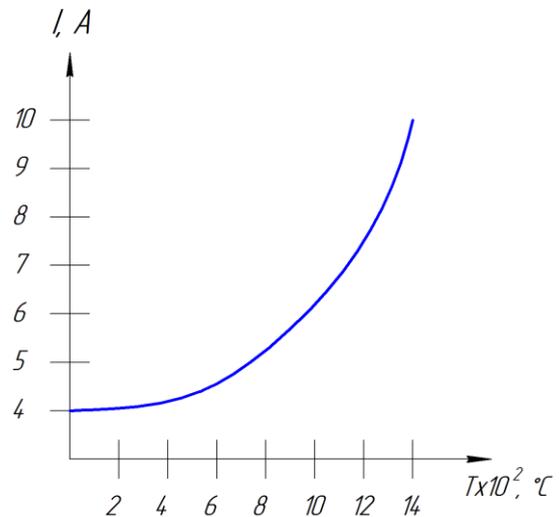


Рис. 3. Зависимость потребляемого тока от температуры нагревателя

Рассмотрим систему регулирования температуры внутри тепловой камеры двигателя по току в резистивном нагревателе, состоящую из объекта управления и управляющего устройства. При разработке системы приняты следующие основные допущения:

- включение ЭТД производится по «горячему» алгоритму, при этом процессы разогрева рабочего тела считаем стационарными;
- рабочее тело в камере двигателя движется с постоянными скоростью и плотностью потока;
- определяющим процессом теплоотдачи является излучение.

Процессы в резистивном нагревателе описываются линейным дифференциальным уравнением [5], где входным сигналом является подводимая мощность, а выходным – температура резистивного нагревателя:

$$T_n \frac{dx_{ввх}(t)}{dt} + x_{ввх}(t) = K_n x_{вх}(t), \quad (6)$$

где  $K_n$  – коэффициент передачи нагревателя;  $T_n$  – постоянная времени нагревателя.

Передачная функция резистивного нагревателя

$$W_n(s) = \frac{K_n}{T_n s + 1}. \quad (7)$$

Структурная схема системы регулирования температуры тепловой камеры двигателя включает в себя ПИД-регулятор с передачной функцией

$W(s) = k_1 + \frac{k_3}{s} + k_2 s$ ; ШИМ-регулятор; резистив-

ный нагреватель с передачной функцией (7); теплообменник, передачная функция которого

$W_t(s) = \frac{K_t}{T_t s + 1}$ ; рабочее тело, передачная функция

которого  $W_{pt}(s) = \frac{K_{pt}}{T_{pt}s + 1}$ ; корпус двигателя,

передаточная функция которого  $W_k(s) = \frac{K_k}{T_k s + 1}$ ;

датчик тока, протекающего через резистивный элемент нагревателя.

Возмущающими воздействиями являются температуры рабочего тела  $q_1$  и внешней окружающей среды  $q_2$ .

На рис. 4 приведена структурная схема системы регулирования температуры в тепловой камере ЭТД с ПИД-законом регулирования.

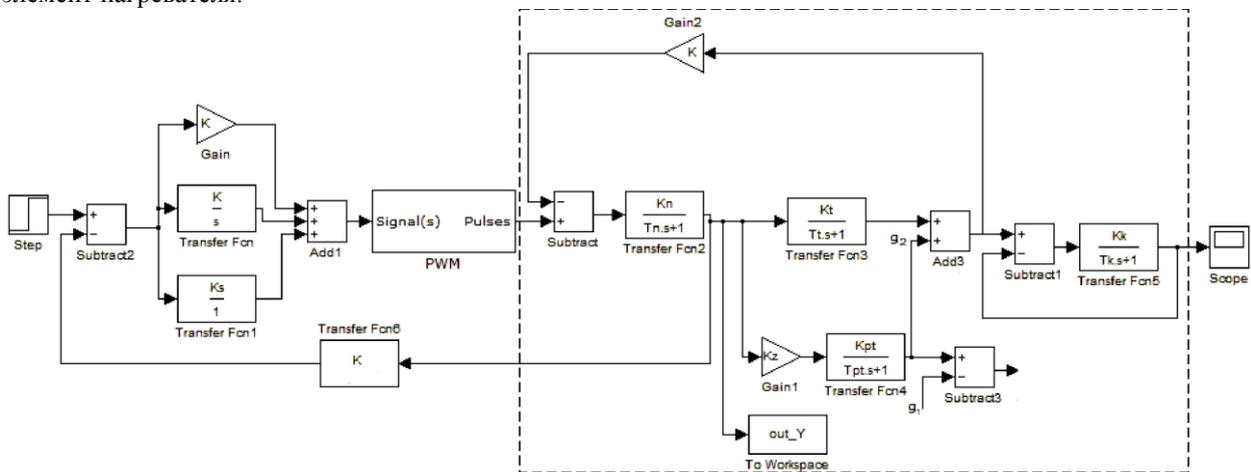


Рис. 4. Структурная схема системы регулирования температуры ЭТД

Параметры звеньев, входящих в рассмотренную систему регулирования, определяются на основе теории теплопередачи и экспериментальных данных [6]. Учитывая, что модель системы является нелинейной, для ее исследования целесообразно использовать численные методы структурного моделирования.

Проведенные экспериментальные исследования в диапазоне мощностей до 300 Вт подтверждают правильность выполненных теоретических расчетов. Экспериментально определено время выхода нагревателя на температуру 1200 °С при потребляемой мощности 240 Вт, которое составляет не более 60 с и ограничено предельным значением мощности бортовой сети, выделяемой на питание ЭТД. Время непрерывной работы – не менее 300 ч.

На изготовленном макете подтверждены возможности надежного контроля и регулировки температуры с отрицательной обратной связью по току нагревателя в соответствии с разработанной моделью и получение заданных технических характеристик ЭТД.

Проведенные исследования и теоретические расчеты показали возможность изготовления высокотемпературного нагревателя из УУКМ с заданными геометрическими размерами и теплофизическими характеристиками для тепловой камеры двигателя и эффективность разработанной системы регулирования температуры.

Полученные результаты могут быть использованы для изготовления различных тепловых узлов электротермического оборудования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Гурин, И.В. Гурин, Ю.Е. Мури, С.Г. Фурсов, В.В. Колосенко, А.А. Корнеев, А.В. Григорьев, А.Н. Буколов. О некоторых возможностях газофазных методов для изготовления углерод-углеродных тепловых узлов для выращивания монокристаллов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1998, в. 4(76), с. 46-55.
2. Д.П. Волков, Ю.П. Зорянич. Теплофизические свойства углерод-углеродных композиционных материалов // *ТВТ*. 1995, т. 33, в. 6, с. 941-947.
3. Е.В. Амелистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др. *Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент*: Справочник. М.: «Энергоиздат», 1982, 512 с.
4. О.А. Герашенко, А.Н. Гордов, В.И. Лах. *Температурные измерения*: Справочник. Киев: «Наукова думка», 1984, 496 с.
5. М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. *Теорія автоматичного керування*: Підручник. Київ: «Либідь», 2007, 656 с.
6. А.Г. Князева. *Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий*: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТГУ, 2009, 357 с.

Статья поступила в редакцию 13.03.2018 г.

## **РОЗРОБКА НАГРІВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ З ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ І СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ДВИГУНА**

*В.Є. Овчаренко, О.В. Токарева, І.В. Гурін*

Запропонована модель системи регулювання температури електротермічного двигуна, основана на зміні електричних параметрів вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ) від температури. Представлені результати експериментальних досліджень та дані рекомендації по розробці та розрахунку параметрів нагрівального елемента із ВВКМ. Приведені дані стендових випробувань, які підтверджують працездатність запропонованої системи регулювання температуро-потужних параметрів теплового вузла електротермічного двигуна.

## **DEVELOPMENT OF THE HEATING ELEMENT FROM CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIAL AND ELECTROTHERMAL THRUSTOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEM**

*V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin*

A model of a system for controlling the temperature of an electrothermal thruster based on a change in the electrical parameters of a carbon-carbon composite material (CCCM) on temperature is proposed. The results of experimental studies are presented and recommendations on the development and calculation of the parameters of the heating element from the CCCM are given. Data of bench tests confirming the operability of the proposed system for regulating of the temperature and power parameters of the thermal unit of the electrothermal thruster are given.