

УДК 629.783.036.72-181.48:004.942

А. В. ПОГУДИН

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ В ФОРМИРОВАНИИ МИКРОСПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ

Предметом исследования в статье является математическая модель двигательной установки, построенной на основе сформированных передаточных функций элементов. **Целью** является рационализация процесса нагрева бортовой двигательной установки на основе математической модели при заданных ограничениях. **Задачи:** формализация процессов в электронагревном двигателе с рабочим телом аммиак, формализация состава модели бортовой двигательной установки, формирование структурной схемы, рассмотрение физических процессов, протекающих в узлах двигательной установки, описание газовых и гидравлических процессов, описание термодинамических и электрокинетических процессов, построение математической модели на основе передаточных функций. **Используемыми методами** являются: модели передаточных функции бака, фильтра, парогенератора, ресивера и жиклера, двигателя с их диапазонами работ. Получены следующие **результаты**. Сформирована структурная схема бортовой двигательной установки, дополненная блоком управления и системой электропитания. Создана формализованная математическая модель бортовой двигательной установки с рабочим телом аммиак. Из неё сформирована модель, состоящая из ключевых элементов, входящих в состав бортовой двигательной установки, которая используется при рационализации нагрева рабочего тела. **Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем: Получила дальнейшее развитие математическая модель электронагревной двигательной установки, находящейся на борту малых космических аппаратов за счет ее применения для расчета тяговых характеристик диспенсера, что позволяет применять аммиачный электронагревный ракетный двигатель при формировании группировки спутников. Введены ограничения рабочих параметров модели. Предложено дальнейшую работоспособность модели определять в среде Matlab Simulink. Таким образом, будет получено рациональное значение параметров силы тока и напряжения, при которых время выхода системы в рабочий режим будет минимально, а тяга максимальна при заданных диапазонах рабочих температур и давления.

Ключевые слова: математическая модель, космический аппарат, бортовая двигательная установка, электронагревный двигатель, рабочее тело, блок управления, бак, фильтр, парогенератор, электроклапан, ресивер, жиклер.

Введение

Современное решение космических задач связано с применением спутниковых группировок. При этом формирование группировок основано на особенностях применения космических двигательных установок (ДУ) и является актуальной задачей. Разработка таких ДУ относится к проектированию сложных систем и применению математического моделирования. Для имитационного моделирования электронагревного двигателя (ЭНД) малых космических аппаратов (КА), а именно каналов хранения и подачи рабочего тела, электропитания, управления и обработки данных необходимо описывать различные объекты, газовые тракты, механические устройства, электрические компоненты и контрол-

леры. В случае моделирования бортовой двигательной установки (БДУ) КА для большей наглядности суммарного действия разнородных процессов наиболее удобен в применении пакет визуального моделирования Simulink в среде Matlab [1]. Однако для его использования необходимо разработать математическую модель БДУ. Поэтому целью статьи является рационализация процесса нагрева БДУ на основе математической модели при заданных ограничениях.

1. Постановка задачи математического моделирования двигательной установки

Спутники, входящие в состав группировок [2], как правило, малые космические аппараты (МКА),

что накладывает ряд ограничений на применение ДУ с ограниченной энергетикой. Среди стран, занимающихся созданием МКА, Украина проводит разработки КА на платформе МС-2-8 [3], где предусмотрена установка электроракетного двигателя нагревного типа. Применение таких двигателей наблюдается и среди зарубежных разработчиков [4]. Особенной проблемой такой ДУ на борту МКА является согласование режимов работы двигателя для формирования спутниковой группировки, с учетом предварительного запуска БДУ с выходом на режим в необходимых точках орбиты. Такая задача может быть решена на основе математической модели процессов, протекающих в ЭНД. Задачей математического моделирования БДУ является формализация процессов в ЭНД с рабочим телом (РТ) – аммиак [5], для дальнейшей рационализации его работы в группировках МКА. Аммиачные ЭНД имеют следующие преимущества:

- отсутствие вытеснительной системы подачи РТ из блока рабочего тела (БРТ);
- простая пневмогидравлическая схема;
- высокий удельный импульс, связанный с практически полной диссоциацией аммиака на химически нейтральные компоненты N_2 и H_2 ;
- высокие эксплуатационные характеристики (мало токсичность и низкая взрывоопасность РТ, низкая температура замерзания РТ).

Для формализации модели рассмотрим состав БДУ:

- блок управления;
- пневмогидравлические узлы (бак, горловина заправочная, вентиль, электроклапаны, парогенератор, ресивер, штуцера проверочные);
- двигатель;
- измерительные (функциональные) и телеметрические датчики давления и температуры;
- трубопроводы; кабели; элементы установки и крепления [6].

Пневмогидравлические узлы БДУ объединены в блоки: блок рабочего тела, блок подачи.

При формировании математической модели БДУ используем структурную схему, представленную на рисунке 1.

2. Физические процессы в узлах БДУ

Физические процессы в узлах БДУ включают следующее: для хранения и подачи жидкого аммиака в тракты БДУ под давлением его насыщенных паров, соответствующим температуре аммиака, используем Б; для очистки аммиака от механических примесей в баке применяем Ф; для подачи жидкого аммиака в магистраль БДУ – ЭКБ, ЭКп, ЭКр; для

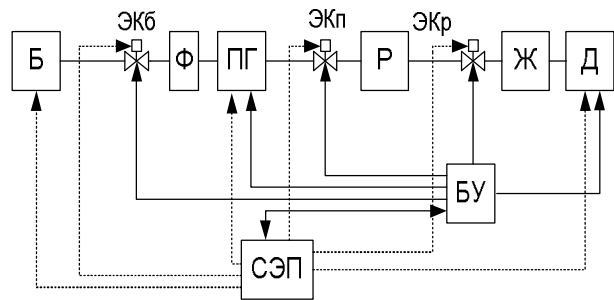


Рис. 1. Структурная схема БДУ: Б – бак; ЭКБ, ЭКп, ЭКр – электроклапан (бака, парогенератора, ресивера); Ф – фильтр; ПГ – парогенератор; Р – ресивер; Ж – жиклер, Д – двигатель; БУ – блок управления; СЭП – система электропитания

испарения аммиака и перегрева его паров перед подачей в ресивер – ПГ; для уменьшения колебаний давления газообразного аммиака на входе в двигатель – Р; для создания реактивной тяги – Д. Согласно анализу физических процессов протекающих в узлах БДУ можно сделать вывод, что они разделяются на газовые, гидравлические, термодинамические и электрокинетические, что требует введения системы уравнений для описания этих процессов, а в конечном итоге – их свертку в уравнение тяги с ограничениями по параметрам.

Рассмотрим газовые и гидравлические процессы в БДУ:

- аммиак в сжиженном состоянии хранится в Б. При помощи нагревателя, установленного в днище Б, аммиак вытесняется в жидкой фазе из Б давлением его насыщенного пара. Так как температура днища Б выше температуры его горловины, жидкая фаза аммиака концентрируется в районе горловины;
- из Б аммиак поступает в ПГ, где испаряется и перегревается до температуры 60 ± 5 °С с целью исключения конденсации жидкой фазы в трактах БДУ;
- из ПГ аммиак порциями поступает в Р таким образом, чтобы давление в последнем поддерживалось с точностью ± 3 %. Из Р перегретый пар аммиака поступает на вход Д. Перед ускорением в сопле Лавалья Д, аммиак разлагается в электронагревном устройстве при температуре 1100 °С практически полностью на молекулы азота и водорода.

БДУ в составе КА заправляется аммиаком на техническом комплексе с использованием специальной передвижной заправочной станции. Цикл подготовки БДУ к включению Д заключается в последовательном задействовании каналов баростатирования Б, термостатирования ПГ, баростатирования Р и термостатирования Д.

Рассмотрим термодинамические и электрокинетические процессы в БДУ:

- баростатирование Б осуществляется включением его нагревателя, повышение давления насыщенного пара аммиака контролируется функциональным потенциометром датчика давления. При достижении давления 12 бар нагреватель выключается, а при понижении давления до величины 10 бар нагреватель включается. Предусматривается отключение нагревателя в случае достижения температуры днища Б более 55 °С;

- термостатирование конструкции ПГ осуществляется при помощи нагревателя по сигналу функционального датчика температуры. При температуре менее 55 °С нагреватель включается, а при температуре более 65 °С выключается;

- баростатирование Р обеспечивается электроклапаном ЭКр по сигналам функционального датчика;

- при термостатировании Д температура РТ поддерживается в диапазоне от 1050 до 1150 °С при помощи нагревателя ДУ по сигналам термопары.

Итак, при работе двигателя ДУ жидкий аммиак через открытые ЭКб поступает в парогенератор ПГ, из которого перегретый пар аммиака ЭКп порциями поступает в Р, в котором поддерживается стабилизированное давление. Из Р пар аммиака через ЭКр направляется в Д где аммиак разлагается в электронагревном устройстве на молекулы азота и водорода которые ускоряются в сопле Лавала и создают тяговое усилие.

Предусматривается принудительное отключение БДУ при помощи БУ в случае превышения заданного времени работы Д. При отключении по команде или в случае отказа БДУ отключается электропитание от всех ее элементов.

Рассмотрев физические процессы в узлах БДУ приступим к созданию ее математической модели.

3. Решение задачи математического моделирования

Основной особенностью рассматриваемой БДУ будет его РТ. РТ аммиак (NH₃) – бесцветный газ с характерным резким запахом и щелочным вкусом, легче воздуха, хорошо растворим в воде (34,2% по массе). Жидкий аммиак представляет собой бесцветную жидкость, дымящуюся на воздухе. В качестве РТ БДУ применяется аммиак, сжиженный технический по ДСТУ ISO 7103:2005 [7], прошедший дополнительную очистку методом дистилляции по специальной технологии.

Для создания математической модели БДУ рассмотрим функциональные зависимости его элементов.

Б является наибольшей по массе и размеру частью конструкции БДУ. Простейшая конструкция Б это емкость, на которой расположена заправочная горловина и клапан-предохранитель. [8] В Б для хранения жидкого рабочего вещества обычно используется вытеснительная система подачи, при этом Б разделен на две полости, одна – вытеснительная, вторая – рабочая. В нашем случае рационально использовать однополостной Б с нагревательным элементом.

Б состоит из обечайки, к которой сваркой крепятся два днища. На одном днище расположен штуцер в виде биметаллического переходника. На другом днище, на плоской поверхности которого установлен нагреватель, который крепится механическим способом винтами МЗ через ленту теплопроводящую ТПМ (при необходимости). Нагреватель предназначен для локального разогрева конструкции бака РТ.

Передаточная функция Б:

$$P_{\text{бак}} = f(V_{\text{бак}}, t^{\circ}_{\text{бак}}, P_{\text{бак}}, t_{\text{бак}}),$$

где $V_{\text{бак}}$ – объем, (2...8)*10⁻³ м³,

$t^{\circ}_{\text{бак}}$ – температура, (0...60) °С,

$P_{\text{бак}}$ – давление, (8...22) *10⁵ Па,

$t_{\text{бак}}$ – время истечения рабочего вещества, 14400 с.

Ф состоит из корпуса и фильтрующего элемента, который в свою очередь состоит из двух слоев сетки с размерами ячеек 20 мкм. Задача Ф – удержание пыли и ржавчины из РТ находящегося в баке. Очистка РТ позволяет повысить герметичность запорных устройств (электроклапанов) и повышает время эксплуатации уплотняющих элементов конструкции подачи РТ.

Передаточная функция Ф:

$$P_{\text{ф}} = f(t_{\text{ф}}, K_{\text{ф}}),$$

где $t_{\text{ф}}$ – задержка использования, (0,1) с,

$K_{\text{ф}}$ – коэффициент фильтрации, (0,8...0,95).

Питание ЭКб, ЭКп, ЭКр осуществляется следующим образом: подается напряжение 28 В на время ≈ 25 мс с последующим его снижением до величины (8...10) В на время включенного состояния [9].

Передаточная функция электроклапана:

$$P_{\text{элк}} = f(v_{\text{элк}}, t_{\text{элк}}^{\circ}, P_{\text{элк}}, t_{\text{элк}}, I_{\text{элк}}, U_{\text{элк}}),$$

где $v_{\text{элк}}$ – скорость истечения газа,

$t_{\text{элк}}^{\circ}$ – температура, °С,

$P_{\text{элк}}$ – давление, Па,

$t_{\text{элк}}$ – время истечения рабочего вещества, 25 мс,

$I_{\text{элк}}$ – сила тока, (0,13...0,35) А,

$U_{\text{элк}}$ – напряжение питания, (10...28) В,

ПГ служит для подогрева и испарения жидкого аммиака, нагрева газообразного аммиака до температуры $(60 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Нагрев происходит в прямолинейных каналах, образованных внутренней структурой поверхности корпуса [10]. Для подвода тепловой мощности установлены четыре нагревателя номинальной мощностью 120 Вт, включаемые одновременно. Для контроля температуры поверхности ПГ в зоне достижения РТ максимальной температуры установлены два датчика температуры. С целью минимизации тепловых потерь ПГ закрыт тепловым экраном.

Передаточная функция ПГ:

$$P_{\text{ПГ}} = f(v_{\text{ПГ}}, I_{\text{ПГ}}, U_{\text{ПГ}}, t_{\text{ПГ}}^{\circ}, P_{\text{ПГ}}, t_{\text{ПГ}}),$$

где $v_{\text{ПГ}}$ – скорость истечения газа,

$I_{\text{ПГ}}$ – сила тока, (0,5...6) А,

$U_{\text{ПГ}}$ – напряжение питания, (10...24) В,

$t_{\text{ПГ}}^{\circ}$ – температура, (0...65) C° ,

$P_{\text{ПГ}}$ – давление, Па,

$t_{\text{ПГ}}$ – время истечения рабочего вещества, с.

Р это емкость, расположенная между ПГ и Д. Он обеспечивает рациональный диапазон давления и температуры газа или пара, при которых обеспечиваются оптимальные условия регулирования расхода РТ, подаваемого в Д.

В ЭНД расход РТ обеспечивается на уровне десятков миллиграмм в секунду. В результате обмена энергией с окружающей средой РТ в Р находится в равновесном состоянии.

Передаточная функция Р:

$$P_{\text{р}} = f(V_{\text{р}}, v_{\text{р}}, t_{\text{р}}^{\circ}, P_{\text{р}}, t_{\text{р}}),$$

где $v_{\text{р}}$ – скорость истечения газа,

$V_{\text{р}}$ – объем Р, $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$,

$t_{\text{р}}^{\circ}$ – температура, (0...65) C° ,

$P_{\text{р}}$ – давление, $(1,85 \cdot 10^5 \dots 2,5 \cdot 10^5)$ Па,

$t_{\text{р}}$ – время истечения рабочего вещества, с.

Ж – калиброванное отверстие для дозированной подачи газа, в нашем случае в Д. Он необходим для дальнейшего снижения давления в системе подачи рабочего вещества. Основным параметр при расчёте Ж это массовый расход газа $\dot{m}_{\text{д}}$. Будем рассматривать простейший случай при стационарном течении газа. Передаточная функция Ж:

$$P_{\text{ж}} = f(\dot{m}_{\text{ж}}, t_{\text{ж}}^{\circ}, v_{\text{ж}}, P_{\text{ж}}, t_{\text{ж}}),$$

где $\dot{m}_{\text{ж}}$ – массовый расход газа, $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ Кг/с}$,

$t_{\text{ж}}^{\circ}$ – температура, C° ,

$v_{\text{ж}}$ – скорость истечения газа,

$P_{\text{ж}}$ – давление, Па,

$t_{\text{ж}}$ – время истечения рабочего вещества, с.

Передаточная функция Д:

$$P_{\text{д}} = f(\dot{m}_{\text{д}}, v_{\text{д}}, U_{\text{д}}, I_{\text{д}}, t_{\text{д}}^{\circ}, t_{\text{д}}),$$

где $\dot{m}_{\text{д}}$ – массовый расход газа, $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ Кг/с}$,

$v_{\text{д}}$ – скорость истечения газа,

$U_{\text{д}}$ – напряжение питания, (24...36) В,

$I_{\text{д}}$ – сила тока (0,5...6), А,

$t_{\text{д}}^{\circ}$ – температура на срезе критического сечения (сопло Лавалья), $(400 \dots 1100) \text{ C}^{\circ}$,

$t_{\text{д}}$ – время работы Д $(1 \dots 720000)$, с

Математическая модель БДУ представляет из себя систему уравнений, неравенств и ограничений входящих в состав БДУ и состоящую из объединения всех передаточных функций элементов БДУ \dot{m}, V, ϑ (вектора тяги ϑ : бака, электроклапанов, парогенератора ресивера, жаклера и двигателя соответственно)

$$\begin{cases} P(\dot{m}_{\text{БДУ}}) = f(\dot{m}_{\text{бак}}, \dot{m}_{\text{элк}}, \dot{m}_{\text{ПГ}}, \dot{m}_{\text{р}}, \dot{m}_{\text{ж}}, \dot{m}_{\text{д}}), \\ P(V_{\text{БДУ}}) = f(V_{\text{бак}}, V_{\text{элк}}, V_{\text{ПГ}}, V_{\text{р}}, V_{\text{ж}}, V_{\text{д}}), \\ P(\vartheta_{\text{БДУ}}) = f(\vartheta_{\text{бак}}, \vartheta_{\text{элк}}, \vartheta_{\text{ПГ}}, \vartheta_{\text{р}}, \vartheta_{\text{ж}}, \vartheta_{\text{д}}). \end{cases}$$

Согласно предварительных расчетов подобных электронагревных ускорителей [11] рабочие диапазоны массового расхода РТ лежат в диапазоне $(2,0 \dots 3,5) \cdot 10^{-6} \text{ Кг/с}$. Диапазон рабочих температур Д составляет $400 \leq T_0 \leq 1100$ и давлений $1,85 \cdot 10^3 \leq P \leq 2,5 \cdot 10^5$ соответственно.

При рационализации нагрева БДУ следует учитывать, что:

– передаточная функция массового расхода газа БДУ $P(\dot{m}_{\text{БДУ}})$ зависит от $\dot{m}_{\text{ж}}$ и $\dot{m}_{\text{Д}}$;

– передаточная функция скорости истечения газа БДУ $P(V_{\text{БДУ}})$ зависит от $V_{\text{ПГ}}$, $V_{\text{Р}}$, $V_{\text{Д}}$;

– передаточная функция вектора тяги $P(\Theta_{\text{БДУ}})$ зависит от начальной установки $\Theta_{\text{Д}}$.

Исходя из этого, система имеет вид:

$$\begin{cases} P(\dot{m}_{\text{БДУ}}) = f(\dot{m}_{\text{ж}}, \dot{m}_{\text{Д}}), \\ P(V_{\text{БДУ}}) = f(V_{\text{ПГ}}, V_{\text{Р}}, V_{\text{Д}}), \\ P(\Theta_{\text{БДУ}}) = f(\Theta_{\text{Д}}). \end{cases}$$

Поэтапно раскрывая передаточные функции каждого элемента системы, зависимость

$$F_{\text{БДУ}} = \dot{m}_{\text{БДУ}} V_{\text{БДУ}},$$

где $F_{\text{БДУ}}$ – тяга БДУ,

$\dot{m}_{\text{БДУ}}$ – массовый расход газа БДУ,

$V_{\text{БДУ}}$ – скорость истечения газа БДУ,

будет определена для каждого необходимого промежутка времени.

Работоспособность математической модели будет рассмотрена позже в процессе ее реализации в среде Matlab Simulink, где будет введено управление тягой БДУ и рационализация процесса нагрева БДУ при моделировании.

Заключение

В статье проведена формализация параметров ЭНД для математического моделирования БДУ, на платформе MS-2-8 для создания группировки МКА. Для формализации модели рассмотрен состав БДУ. Построена структурная схема БДУ. Рассмотрены физические, термодинамические и электрокинетические процессы в БДУ. Сформированы передаточные функции: Б, ЭКб, ЭКп, ЭКр, Ф; ПГ; Р; Ж и Д. Получена математическая модель общего вида и на ее основании сформирована математическая модель узких мест системы, для дальнейшей рационализации процесса нагрева БДУ. Входными параметрами математической модели являются массовый расход газа и скорость его истечения, а выходной параметр – тяга бортовой двигательной установки. Накладывается ряд ограничений по температуре в Р и Д и давлению в канале газового тракта. Выведена матема-

тическая модель ЭНД МКА с рабочим телом аммиак, включающая в себя систему уравнений, неравенств и ограничений. В последующем будет проведено моделирование данной математической модели в пакете визуального моделирования Simulink в среде Matlab с целью определения рациональных значений силы тока и напряжения влияющих на выходные параметры температур и давления. Таким образом, будет выбрано рациональное значение параметров, при которых время выхода системы в рабочий режим будет минимально, а тяга максимальна при заданных диапазонах рабочих температур и давления. Данная БДУ найдет свое применение на борту диспенсеров

Литература

1. Погудин, А. В. Обоснование выбора среды моделирования электропитания электронагревного двигателя малых космических аппаратов [Текст] / А. В. Погудин // *Збірник матеріалів конференції "Всеукраїнська науково-технічна конференція Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2017"*, Харків, 21–23 лист. 2017 р. – X., 2017. – Том 1. – С. 220.
2. Погудин, А. В. Обзор характеристик и методов создания группировки малых космических аппаратов [Текст] / А. В. Погудин, С. Н. Губин // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Харьков, 2017. – Вып. 75. – С. 57–66.
3. Даниев, Ю. Ф. Космические летательные аппараты. Назначение, структура и основные этапы создания : учеб. пособие для студентов инженер. спец. ВУЗов [Текст] / Ю. Ф. Даниев [и др.] ; Под общ. ред. А. Н. Петренко. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 124 с.
4. Lev, D. R. Heated Gas Propulsion System Conceptual Design for the SAMSON Nano-Satellite (Propulsion) [Text] / D.R. Lev, J. Herscovitz, D. Kariv, I. Mizrahi // *J. Small Satellites*. – 2017. – Т. 6, № 1. – P. 551-564.
5. Погудин, А. В. Особенности рационального управления двигательных установок для формирования спутниковой группировки [Текст] / А. В. Погудин, С. В. Губин // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Харьков, 2017. – Вып. 78. – С. 74–82.
6. Parker, K. I. State-of-the-Art for Small Satellite Propulsion Systems [Electronic resource] / K. I. Parker. – Access mode: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160010571.pdf>. – 1.06. 2018.

7. ДСТУ ГОСТ 28326.2:2009 (ISO 7103:2005) Амміак рідкий технічний. Визначення масової частини води методом Фішера [Текст]. – На заміну ГОСТ 28326.2-89, чинний з 2009-12-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 8 с.

8. Rhodes, Brandie L. *Satellite Fuel Estimation Algorithm and Application to the Defense Satellite Communication System III (DSCS III)* [Electronic resource] / Brandie L. Rhodes, Mark J. Mueller. – Access mode: <https://doi.org/10.2514/6.2015-4150> – 1.06.2018.

9. Zhao, J., *Different boost voltage effects on the dynamic response and energy losses of high-speed solenoid valves* [Electronic resource] / J. Zhao, M. Wang, Z. Wang. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.117>. – 1.06.2018.

10. Peyman Sindareh-Esfahani *Thermodynamic modeling based optimization for thermal systems in heat recovery steam generator during cold start-up operation* [Electronic resource] / Peyman Sindareh-Esfahani, Ali Ghaffari, Pouria Ahmadi. – Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.031>. – 1.06.2018.

11. Гайдюков, В. Ф. *Выбор параметров и расчет электронагревного ракетного двигателя. учеб. пособие для студентов инженер. спец. ВУЗов* [Текст] / В. Ф. Гайдюков, В. В. Ковалевский. – Харьков : Харьковский авиационный институт, 1988. – 50 с.

References

1. Pogudin, A. V. Substantiation of the selection of the simulation environment for power supply of the electric heating engine of small space vehicles. *Zbirnik materialiv konferentsii "Vseukraïns'ka naukovo-tehnicna konferentsiya Integrovani komp'yuterni tekhnologii v mashinobudu-vanni IKTM-2017"* [Proc. of the conference "All-Ukrainian Scientific and Technical Conference Integrated Computer Technologies in Machine-Building ICTM-2017"]. Kharkiv, 2017, vol. 1, pp. 220 (In Russian).

2. Pogudin, A. V., Gubin, C. N. *Obzor kharakteristik i metodov sozdaniya gruppirovki malykh kosmicheskikh apparatov* [Overview of the characteristics and methods of creating a small spacecraft group] *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*, 2017, no. 75, pp. 57 – 66.

3. Daniev, Yu. F. *Kosmicheskie letatel'nye apparaty. Naznachenie, struktura i osnovnye etapy sozdaniya: Ucheb. posobie dlya studentov inzhener. spets.*

VUZov [Spacecraft. Purpose, structure and main stages of creation: Proc. allowance for student's engineer. specialist. Universities]. Dnepr, Sistemnye tekhnologii Publ., 2005. 124 p.

4. Lev, D. R., Herscovitz, J., Kariv, D., Mizrach, I. *Heated Gas Propulsion System Conceptual Design for the SAMSON Nano-Satellite (Propulsion)*. *Small Satellites*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 551-564.

5. Pogudin, A. V., Gubin, S. V. *Osobennosti ratsional'nogo upravleniya dvigatel'nykh ustanovok dlya formirovaniya sputnikovoi gruppirovki* [Features of the rational control of propulsion systems for the formation of a satellite constellation]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*, 2017, no. 78, pp. 74 – 82.

6. Parker, K. I. *State-of-the-Art for Small Satellite Propulsion Systems*, 2016. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160010571.pdf> (accessed 1.06.2018).

7. ДСТУ ГОСТ 28326.2:2009 (ISO 7103:2005) Амміак рідкий технічний. Визначення масової частини води методом Фішера [State Standard 28326.2:2009 Ammonia liquid technical. Determination of the mass fraction of water by the Fisher method]. Kii, Derzhspozhivstandart Ukraini Publ., 2007. 8 p.

8. Rhodes, Brandie L., Mueller, Mark J. *Satellite Fuel Estimation Algorithm and Application to the Defense Satellite Communication System III (DSCS III)* Available at: <https://doi.org/10.2514/6.2015-4150> (accessed 1.06.2018).

9. Zhao, J., Wang, M., Wang, Z. *Different boost voltage effects on the dynamic response and energy losses of high-speed solenoid valves*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.117> (accessed 1.06.2018).

10. Peyman, Sindareh-Esfahani, Ali, Ghaffari, Pouria, Ahmadi *Thermodynamic modeling based optimization for thermal systems in heat recovery steam generator during cold start-up operation*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.031> (accessed 1.06.2018).

11. Gaidukov, V. F., Kovalevskii, V. V. *Выбор параметров и расчет электронагревного ракетного двигателя. Учеб. пособие для студентов инженер. спес. ВУЗов* [Selection of parameters and calculation of an electro-heated rocket engine. Textbook. allowance for students engineer. specialist. Universities] *Kharkiv, Khar'kovskii aviatsionnyi institut*, 1988, 50 p.

Поступила в редакцію 1.06.2018, рассмотрена на редколлегии 19.06.2018

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНАГРІВНОЇ РУХОВОЇ УСТАНОВКИ У ФОРМУВАННІ МІКРОСУПУТНИКОВОГО УГРУПОВАННЯ

А. В. Погудін

Предметом дослідження в статті є математична модель рухової установки побудованої на основі сформованих передавальних функцій елементів. Метою є раціоналізація процесу нагріву бортової рухової установки на основі математичної моделі при заданих обмеженнях. Завдання: формалізація процесів в електро-

нагрівному двигуні з робочим тілом аміак, формалізація складу моделі бортової рухової установки, формування структурної схеми, розгляд фізичних процесів, що протікають в вузлах рухової установки, опис газових і гідравлічних процесів, опис термодинамічних і електрокінетичних процесів, побудова математичної моделі на основі передавальних функцій. Використовуваними методами є: моделі передавальних функцій баку, фільтру, парогенератору, ресиверу і жиклера, двигуну з їх діапазонами робіт. Отримані наступні результати. Сформована структурна схема бортової рухової установки, що доповнено блоком управління і системою електроживлення. Створена формалізована математична модель бортової рухової установки з робочим тілом аміак. З неї сформована модель, що складається з ключових елементів, які входять до складу бортової рухової установки, яка використовується при раціоналізації нагріву робочого тіла. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: отримала подальший розвиток математична модель електронагрівної рухової установки, що знаходиться на борту малих космічних апаратів за рахунок її застосування для розрахунку тягових характеристик диспенсеру, що дозволяє застосовувати аміачний електронагрівний ракетний двигун при формуванні угруповання супутників. Введено обмеження робочих параметрів моделі. Запропоновано подальшу працездатність моделі визначати в середовищі Matlab Simulink. Таким чином, буде отримано раціональне значення параметрів сили струму і напруги, при яких час виходу системи в робочий режим буде мінімально, а тяга максимальна при заданих діапазонах температур і тиску.

Ключові слова: математична модель, космічний апарат, бортова рухова установка, електронагрівний двигун, робоче тіло, блок управління, бак, фільтр, парогенератор, електроклапан, ресивер, жиклер.

MATHEMATICAL MODELING OF OMIC PROPULSION SYSTEM IN MICROSATELLITE GROUP FORMING

A. V. Pohudin

The subject of the study in the article is the mathematical model of the propulsion system. It is built on the basis of the formed transfer functions of the elements. The goal is to rationalize the process of heating the onboard propulsion system on the basis of mathematical model under given constraints. Tasks: formalization of processes in an electric heating engine with a working body ammonia; formalization of the model of the onboard propulsion system; formation of the structural scheme; consideration of physical processes occurring in the nodes of the propulsion system; description of gas and hydraulic processes; the description of thermodynamic and electrokinetic processes; The construction of a mathematical model based on transfer functions. The methods used are: models of transfer functions of a tank, a filter, a steam generator, a receiver and a jet, an engine with their ranges of work. The following results are obtained. A block diagram of the onboard propulsion system was added, supplemented with a control unit and a power supply system. A formalized mathematical model of an onboard propulsion system with working body ammonia is created. From it formed a model consisting of the key elements that make up the onboard propulsion system, which is used when rationalizing the heating of the working fluid. The scientific novelty of the results is as follows. The mathematical model of the electro-heating propulsion system onboard small space vehicles has been further developed through its application to calculate the traction characteristics of the dispenser, which makes it possible to use an ammonia electric heating rocket engine in the formation of a constellation of satellites. The limitations of the operating parameters of the model are introduced. It was proposed to conduct the further workability of the model in Matlab Simulink. Thus, a rational value of the current and voltage parameters will be obtained, at which the time of the system's output to the operating mode will be minimal, and the thrust is maximum for the given operating temperature and pressure ranges.

Keywords: mathematical model, space vehicle, airborne propulsion system, electric heating motor, working body, control unit, tank, filter, steam generator, electro-valve, receiver, jet.

Погудин Андрей Владимирович – аспирант кафедры космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: andrey.pohudin@gmail.com.

Pogudin Andrey Vladimirovich – PhD student of Dept. of Space Technology and Unconventional Energy Sources, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: andrey.pohudin@gmail.com.