

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТРЕХСТАДИЙНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Павлов Д.В.*, Петров Д.С.**

Ракетно-космическая корпорация «Энергия»,
ул. Ленина, 4А, Королёв, Московская обл., 141070, Россия

* e-mail: dmitripavlov@inbox.ru

** e-mail: dmitry.s.petrov@engineer.com

Рассмотрено применение нового метода имитационного моделирования для решения задач, возникающих при управлении полетом космических аппаратов. С использованием разработанного авторами метода моделирования, основанного на трехстадийной декомпозиции исследуемой системы, создана библиотека стандартных элементов для моделирования течения жидкостей по трубопроводам. Данная библиотека использована для разработки жидкостного контура абстрактной системы терморегулирования. Приведены результаты моделирования. Сделаны выводы о возможности использования библиотеки для создания моделей систем терморегулирования и других бортовых систем реальных космических аппаратов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, космический аппарат, система терморегулирования, трехстадийная декомпозиция.

Введение

При проектировании и в процессе эксплуатации космических систем (КС) широко применяется численное экспериментирование с использованием современных вычислительных методов. Разрабатываются имитационные модели (ИМ), отражающие функционирование бортовых систем космического аппарата (КА) и наземных средств. С использованием этих моделей производится верификация разработанного плана полета, проверка правильности и эффективности решений, принимаемых при возникновении нештатных ситуаций [1].

В настоящий момент существуют различные средства и среды разработки ИМ. Наиболее широко распространена концепция *функциональных преобразователей* (ФП), основанная на разделении модели на составные части, каждая из которых имеет детерминированные входы и выходы и может быть представлена в виде явного алгебраического уравнения вида $y = f(x, z, t)$, где x — входные данные, y — выходные данные, z — вектор состояния (ВС), t — модельное время. Концепция ФП имеет существенный недостаток — с ее помощью могут описываться только односторонние связи между составными частями модели.

Наиболее распространенной концепцией моделирования, позволяющей описывать двусторонние связи, является методология *Bond Graph* [2–4]. Данная методология позволяет разрабатывать модели из небольших стандартных элементов — накопителей и передатчиков энергии различной физической природы, однако ограничивает разработчика линейными уравнениями и не позволяет строить иерархию ИМ, что необходимо для моделирования сложных технических систем, таких, как КС.

Существуют также общие языки моделирования, такие, как *AMPL* (см., например, [5]), которые позволяют записывать дифференциальные и алгебраические уравнения в определенном формате для последующего численного решения. Такие языки обладают колоссальными возможностями моделирования, но требуют предварительной привязки к конкретной предметной области.

Авторами ранее был разработан оригинальный метод моделирования, основанный на трехстадийной декомпозиции исследуемой системы (ТДИС, [6]) и охватывающий все фазы моделирования — от декомпозиции космической системы до построения мельчайших составных частей имитационной модели. Данный метод ранее применялся для моде-

лирования физических явлений, существенных для работы двигательной установки КА. В настоящей работе на основе ТДИС подробно будут описаны модели физических явлений, важные для работы жидкостных контуров системы терморегулирования (СТР) КА.

1. Математическая модель исследуемой системы

1.1. Структура и функционирование системы терморегулирования

Система терморегулирования КА «Союз ТМА-М» и «Прогресс М-М», используемых в настоящее время, построена на основе циркуляции жидкого теплоносителя в замкнутых контурах. Работа этих СТР описана в статье [7].

Данные бортовые системы обладают высокой степенью надежности, достигаемой путем разделения СТР на два контура и, отчасти, с помощью резервирования агрегатов. В настоящей статье предлагается упрощенная одноконтурная СТР, основанная на тех же принципах работы, что и СТР реальных КА, состоящая из тех же элементов, но исключая резервирование. Схема СТР приведена на рис. 1.

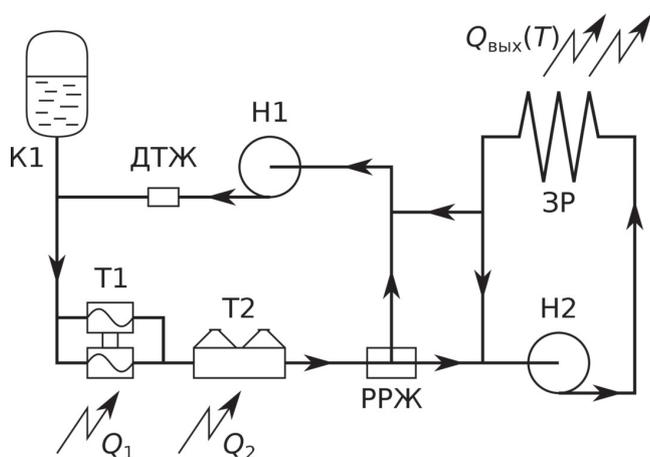


Рис. 1. Схема системы терморегулирования

СТР предназначена для термостатирования агрегатов КА. Современные теплоизоляционные покрытия, используемые в космической технике, позволяют свести величину нежелательного теплового обмена через корпус КА к пренебрежимо малому значению. В результате корпус КА считается абсолютным теплоизолятором, а термостатирование обеспечивается путем теплообмена агрегатов с жидким теплоносителем, циркулирующим по трубопроводам СТР, и последующего охлаждения теплоносителя в специально предусмотренном радиаторе.

Теплоноситель циркулирует по сообщающимся внутренней и наружной частям контура. Циркуляция обеспечивается работой насосов Н1 и Н2. Рабочая жидкость (РЖ), проходящая по внутренней части контура, обеспечивает отбор тепла от теплообменников Т1 и Т2. В наружной части контура РЖ, протекая через змеевик радиатора (ЗР), отдает тепловую энергию радиатору, который, в свою очередь, излучает ее в окружающее пространство. Обмен «холодной» РЖ наружной части контура и «горячей» РЖ внутренней части контура производится в зависимости от положения заслонки регулятора расхода жидкости (РРЖ).

Управление РРЖ производится автоматически по сигналам датчика температуры жидкости (ДТЖ): температура РЖ поддерживается в интервале $[T_1, T_2]$. При $T > T_2$ схема управления формирует сигнал на «открытие» РРЖ, т.е. такое движение заслонки РРЖ, в результате которого поток РЖ от РРЖ в наружную часть контура увеличивается, а во внутреннюю — уменьшается. При $T < T_1$ формируется сигнал на «закрытие» РРЖ, в результате чего поток РЖ от РРЖ в наружную часть контура уменьшается, а во внутреннюю — увеличивается.

Давление в контуре СТР создается компенсатором К1, который представляет собой баллон, разделенный на две части упругой мембраной. Одна часть баллона заполнена идеальным газом, в другую заливается РЖ. При повышении температуры РЖ расширяется, избыток переходит в К1, в результате чего увеличивается давление в газовой полости и РЖ в контуре.

1.2. Математическая модель процесса течения жидкости по трубопроводам

Для моделирования системы терморегулирования авторами был разработан подход, позволяющий описывать течение жидкого или газообразного рабочего тела (РТ) по трубопроводам бортовой системы (ТБС). Основные положения этого подхода изложены в работе [8] и приводятся в настоящей статье. Для модели СТР свойства РТ предполагались соответствующими несжимаемой жидкости.

ТБС представляют собой множество труб, соединяющих узловые точки (УТ). УТ являются местом соединения труб, каждая труба обеспечивает течение РТ между ровно двумя УТ. РТ перетекает между УТ и трубами при наличии градиента давления p и конечного гидродинамического сопротивления трубы. Внутри УТ градиент давления отсутствует, давление вдоль труб меняется в зависимости от закона течения и величины гидродинамического сопротивления.

Каждый элемент ТБС — УТ или труба — имеет объем V , который считается заполненным РТ (общая модель частичного заполнения объема элемента ТБС не рассматривалась в настоящей работе, поскольку при имитационном моделировании существенны только некоторые специальные случаи частичного заполнения). Если значение объема установлено в нуль, считается что в рамках поставленной задачи этот объем несуществен.

Для РТ в объеме УТ с номером i может быть записан закон сохранения массы:

$$\sum_{j \in A_i} q_{ij} = \begin{cases} 0, & V_i = 0; \\ V_i \rho_i, & V_i \neq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь A_i — множество номеров труб, присоединенных к i -й УТ; q_{ij} — масса РТ, втекающего из j -й трубы в i -ю УТ за единицу времени; V_i — объем РТ в i -й УТ; ρ_i — плотность РТ в i -й УТ.

Закон сохранения массы для РТ в объеме трубы с номером k , соединяющей УТ с номерами m и n , может быть записан в виде

$$\sum_{l \in \{m,n\}} q_{kl} = \begin{cases} 0, & V_k = 0; \\ V_k \dot{\rho}_k, & V_k \neq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где q_{kl} — масса РТ, втекающего в k -ю трубу из l -й УТ.

Плотность РТ в объеме элемента ТБС — УТ или трубы — может изменяться за счет изменения давления p и температуры T :

$$\dot{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \dot{p} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \dot{T}. \quad (3)$$

Производные плотности по давлению и температуре вычислялись из уравнения состояния РТ. Для несжимаемой жидкости справедливы выражения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial T} = -\beta T, \quad (4)$$

где β — коэффициент объемного расширения жидкости.

В соответствии с разработанной в [8] моделью температура РТ в объеме элемента ТБС с номером i может изменяться вследствие смешивания потоков с различной температурой, расширения при течении по трубопроводам

$$\rho_i V_i \dot{T}_i = \sum_{j \in B_i} q_{ij} (T_{ij}' - T_i) \quad (5)$$

и теплообмена с внешними телами

$$c \rho_i V_i \dot{T}_i = E_i. \quad (6)$$

Здесь B_i — множество номеров элементов ТБС, из которых РТ втекает в элемент ТБС с номером i ; q_{ij} — масса РТ, втекающего из элемента ТБС с номером j в элемент ТБС с номером i ; T_{ij}' — температура РТ, истекающего из элемента ТБС с номером j в элемент ТБС с номером i ; c — теплоемкость единицы массы РТ в рассматриваемом процессе течения; E_i — теплота, сообщаемая извне элементу ТБС с номером i за единицу времени.

Температура T_{ij}' определяется процессом течения РТ. В случае течения несжимаемой жидкости $T_{ij}' = T_j$. Если объем элемента ТБС V_i мал, выражение (5) вырождается в следующее:

$$T_i \sum_{j \in B_i} q_{ij} = \sum_{j \in B_i} q_{ij} T_j'. \quad (7)$$

Для определения давлений в УТ должно использоваться уравнение (3) совместно с формулами

$\frac{\partial p}{\partial p}, \frac{\partial p}{\partial T}$ и зависимостью $q(p_m, p_n)$. В случае несжи-

маемой жидкости $V_i \frac{\partial p}{\partial p} = 0$ и давление p_i в i -м УТ

определяется из следующего алгебраического уравнения:

$$V_i \dot{T}_i \frac{\partial p}{\partial T} - \sum_{j \in D_i} q_{ij} = 0, \quad (8)$$

где D_i — множество номеров всех элементов ТБС, подключенных к i -му.

Зависимость между расходом через трубу, соединяющую УТ с номерами m и n и давлениями в этих УТ $q(p_m, p_n)$, определяется процессом течения РТ. При расчете этой зависимости труба считалась имеющей форму цилиндра, а течение — ламинарным. Для такого течения справедливо следующее выражение (см. [9]):

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{8\nu q}{\pi a^4}, \quad (9)$$

где x изменяется вдоль оси трубы; p — давление в сечении трубы; ν — кинематическая вязкость жидкости; q — расход через сечение трубы; a — радиус трубы.

При течении несжимаемой жидкости температура всюду вдоль трубы считается одинаковой, но изменяющейся со временем в связи с перечисленными выше факторами. Изменение температуры РТ порождало изменение массового расхода $q(x)$ вдоль координаты x :

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \pi a^2 \frac{\partial \rho}{\partial T} \dot{T}. \quad (10)$$

Интегрирование (9) для случая несжимаемой жидкости с учетом (10) дает связь между давлениями в УТ с номерами m и n и расходом q через трубу с номером i , соединяющую эти УТ:

$$p_m - p_n = \chi_i \nu q; \quad q = q_{im} - \frac{\delta q_i}{2} = -q_{in} + \frac{\delta q_i}{2}; \quad (11)$$

$$\chi_i = \frac{8l}{\pi a^4}; \quad \delta q_i = V_i \frac{\partial \rho}{\partial T} \dot{T},$$

где χ_i — геометрическая характеристика трубы i ; l — длина трубы; q — расход через трубу i от УТ m к УТ n ; δq_i — разница между входным и выходным расходом трубы i ; $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ определяется из (4); \dot{T} — из (5) и (6).

2. Разработка имитационной модели исследуемой системы

2.1. Основные принципы моделирования

Мельчайшим элементом, получаемым в результате ТДИС, являются фрагменты — модели участия простых деталей в определенном физическом взаимодействии (подробнее см. [6]). Классы фрагментов составляют конечное множество универсальных элементов, из экземпляров которых, т. е. фрагментов, строятся разнообразные модели. Структура модели задается путем соединения фрагментов объектами-связями (ОС).

Для классов фрагментов определяются наборы параметров и подпрограмм. Параметры отражают физические свойства моделируемой детали, а подпрограммы обеспечивают учет зависимостей между параметрами.

ОС обеспечивают копирование параметров одного фрагмента в другой. Таким образом, из разрозненных подпрограмм создается модель всей исследуемой системы с точки зрения определенного физического взаимодействия.

При моделировании выделялись три различных типа подпрограмм:

обеспечивающих решение явных алгебраических

$$y_i = f(y_1 \dots y_{i-1}, y_{i+1} \dots y_n), \quad (12)$$

неявных алгебраических

$$F(y_1 \dots y_{j-1}, y_j, y_{j+1} \dots y_n) = 0 \quad (13)$$

и разрешенных относительно производной дифференциальных уравнений первого порядка

$$\dot{y}_k = g(y_1 \dots y_n). \quad (14)$$

Уравнения вида, отличного от (12)—(14), сводились к одному из данных при помощи введения вспомогательных переменных. Для уравнений вида (13) были реализованы подпрограммы, вычисляющие $\bar{F}(y_1 \dots y_n)$. Решение системы уравнений (12)—(14) обеспечивалось универсальной подпрограммой, использующие библиотечную реализацию итерационного алгоритма Бройдена—Флетчера—Гольдфарба—Шанно (BFGS). На каждой итерации вычислялись значения $\bar{\delta} = \bar{F}(y_1 \dots y_n)$, производилась численная оценка матрицы Якоби $\frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{y}}(y_1 \dots y_n)$ и осуществлялась вариация параметров $y_1 \dots y_n$, уменьшающая $\|\bar{\delta}\|$.

В соответствии с ТДИС из фрагментов составлялись простые модели (ПМ), в сущности моделирующие гомогенные простые детали исследуемой системы.

Прототип ПМ мог участвовать в нескольких различных физических взаимодействиях; в таком случае в состав ПМ включалось несколько фрагментов, относящихся к выбранным взаимодействиям. Для различных комбинаций фрагментов были разработаны дополнительные подпрограммы, описывающие связи между параметрами различных физических взаимодействий.

2.2. Разработка стандартных элементов модели

Моделирование физических взаимодействий было разделено на составные части. Были разработаны классы фрагментов для моделирования раздельно тепловых явлений, процесса течения жидкости, для хранения свойств вещества и свойств емкости жидкого или газообразного вещества.

Для моделирования тепловых явлений использовались классы фрагментов «тепловой аккумулятор» (Та) и «тепловой контактный проводник» (Тк), разработанные в [6]. Классы фрагментов «гидродинамических»

намический узел» (Гу) и «гидродинамический проводник» (Гп), «свойства жидкого вещества» (Вж) и «свойства объема» (Оо) были разработаны в рамках настоящей статьи.

С помощью различных сочетаний фрагментов в одной ПМ возможно моделировать различные физические явления (рис. 2).

ПМ. Присутствующие в ПМ фрагменты обозначены знаком «+», отсутствующие — знаком «-».

Для моделирования трубопроводов СТР использовалась комбинации фрагментов «+Гп+Вж+Оо+Та», а объема компенсатора — «+Гу+Вж+Оо». Схема решения систем алгебраических уравнений для этих комбинаций приведена соответственно на рис. 4 и 3.

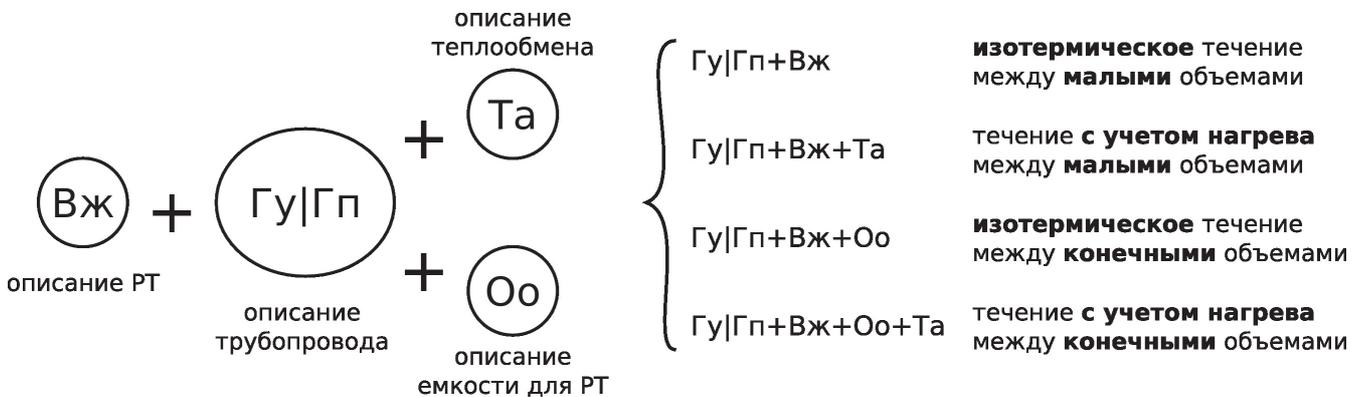


Рис. 2. Варианты моделирования течения РТ: Вж — фрагмент «свойства жидкого вещества», Та — фрагмент «тепловой аккумулятор», Оо — фрагмент «свойства объема», Гу|Гп — фрагмент «гидродинамический узел» или «гидродинамический проводник». ПМ, содержащей определенную комбинацию фрагментов, соответствует набор моделируемых явлений. Справа представлены различные комбинации фрагментов внутри ПМ и характеристика физических явлений, моделируемых этими комбинациями

Описание классов фрагментов и ОС, используемых в данной работе, приведено в табл. 1.

Для моделирования были также разработаны подпрограммы, обеспечивающие связь между фрагментами перечисленных классов. Контроль над отсутствием конфликтов между результатами вычислений различных подпрограмм, относящихся к одной ПМ, осуществлялся вручную: не допускалась запись значения одного и того же параметра фрагмента ПМ из различных подпрограмм, относящихся к этой ПМ.

В табл. 2 приведено описание взаимных связей между параметрами различных фрагментов одной

«Зацикливания» при решении явных алгебраических уравнений при моделировании трубопроводов не возникает, поскольку параметр T_a, T_i не используется для расчета параметра T_a, C (см. табл. 2 и пунктирные стрелки на рис. 4).

Были разработаны компоненты — модели элементов СТР: труб, точек соединения труб, компенсатора, насосов и РРЖ (подробнее см. [6]). В состав моделей труб и точек соединения труб входило по одной ПМ с наборами фрагментов «+Гп+Вж+Оо+Та» и «+Гу+Вж» соответственно.

В состав модели компенсатора входила одна ПМ, включающая фрагменты «+Гу+Вж+Оо». Па-

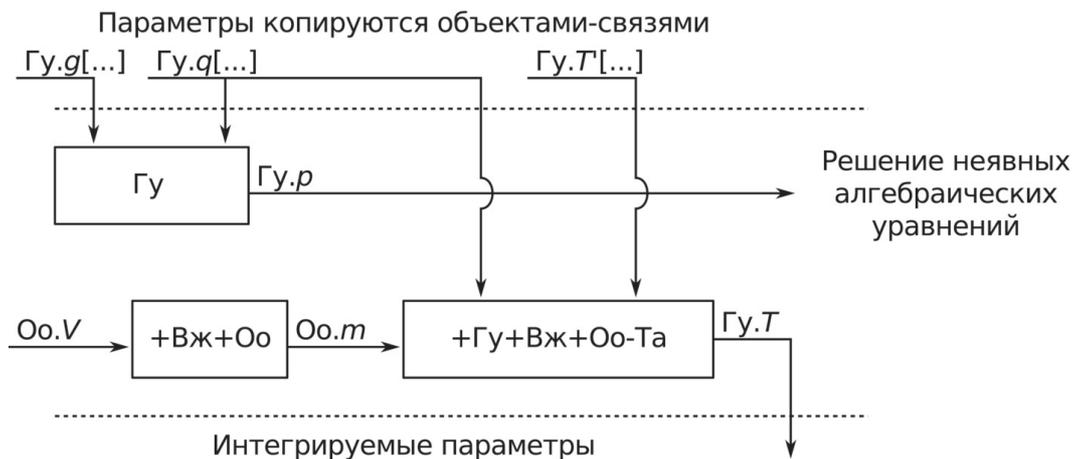


Рис. 3. Решение явных алгебраических уравнений для комбинации фрагментов «+Гу+Вж+Оо»

Таблица 1

Описание классов фрагментов и ОС

Гидродинамика	
Параметры/контакты	Расчетные формулы
Гу	
Давление p Производная давления p_t Расход в j -й Гп q_j Геометрическая характеристика проводимости j -го Гп g_j Дополнительное изменение массы РТ в узле m_t Температура РТ T Температура РТ, вытекающей из j -го Гп t_j'	вида (13): $\frac{\sum_j q_j + m_t}{\sum_j g_j} = 0$ вида (14): $\dot{p} = p_t$
1 контакт: ∞ Гп	
Гп	
Давления в Гу, присоед. к контактам 1 и 2 p_1, p_2 Геометрическая характеристика проводимости g Расходы из Гу, присоед. к контактам 1 и 2 q_1, q_2 Средний расход от 1-го ко 2-му контакту q Разница между втекающим и вытекающим расходом δq Дополнительное изменение массы РТ в Гп m_t Температура РТ, истекающей из Гу, присоед. к контактам 1 и 2 T_1', T_2' Температура РТ в Гп T Перепад давления, создаваемый внешним воздействием $\Delta p_{ex}[\dots]$	вида (12): $m_t = \delta q$ $q_1 = q + 0.5\delta q$ $q_2 = -q + 0.5\delta q$
Контакт «1»: $1 \times Гу$ Контакт «2»: $1 \times Гу$	
Емкость для РТ	
Оо	
Объем емкости V Масса РТ в емкости m Различные изменения массы $m_t[\dots]$	вида (14): $\dot{m} = \sum_j m_t [j]$
Свойства вещества	
Вж	
Плотность РТ для температуры T_0 ρ_0 Коэффициент объемного расширения β Производная плотности по температуре ρ_t Производная плотности по давлению ρ_p Текущая плотность РТ ρ Динамическая вязкость РТ ν Удельная теплоемкость РТ c Температура, для которой определены параметры T_0	вида (12): $\rho_T = -\beta \cdot \rho$ $\rho_p = 0$
Передача тепла	
Та	
Температура T Теплоемкость C Поток тепла от j -го Тк P_j Доп. поток тепла (см. [6]) W	вида (14): $\dot{T} = \frac{1}{C} \left(W + \sum_j P_j \right)$
1 контакт: ∞ Тк	
Тк	
Тепловая проводимость κ Температура присоед. Та T_1, T_2 Поток тепла от Та, «1» \rightarrow «2» P	вида (12): $P = \kappa(T_1 - T_2)$
Контакт «1»: $1 \times Та$ Контакт «2»: $1 \times Та$	

Таблица 2

Связи между параметрами фрагментов внутри ПМ

Комбинации фрагментов	Расчетные формулы
+Вж+Оо	вида (12): $Oo.m = Вж.ρ \cdot Oo.V$
+Вж+Та	вида (12): $Вж.ρ = Вж.ρ_0 \cdot \exp(-Вж.β \cdot (Та.T - Вж.T_0))$
+Вж+Оо+Та	вида (12): $Oo.m_t [ρ_T] = Та.T_t \cdot Вж.ρ_T \cdot Oo.V$ $Та.C = Oo.V \cdot Вж.ρ \cdot Вж.c$
+Гу+Оо	вида (12): $Гу.m_t = \sum_j Oo.m_t [j]$
+Гп+Оо	вида (12): $Гп.m_t = \sum_j Oo.m_t [j]$
+Гп+Вж	вида (12): $Гп.q = \frac{Гп.g}{Вж.v} \left((Гп.p_1 - Гп.p_2) + \sum_j Гп.Δp_{ext} [j] \right)$
+Гу+ Вж-Оо-Та	вида (12): $Гу.T = \frac{\sum_{j \in B} Гу.q_j \cdot Гу.T_j'}{\sum_{j \in B} Гу.q_j}, B = \{j q_j > 0\}$
+Гп+ Вж-Оо-Та	вида (12): $Гп.T = \frac{\sum_{j \in B} Гп.q_j \cdot Гп.T_j'}{\sum_{j \in B} Гп.q_j}, B \subset \{1,2\}, B = \{j q_j > 0\}$
+Гу+ Вж+Оо-Та	вида (14): $Гу.T' = \frac{\sum_{j \in B} Гу.q_j \cdot (Гу.T_j' - Гу.T)}{Oo.m}, B = \{j q_j > 0\}$
+Гп+ Вж+Оо-Та	вида (14): $Гп.T' = \frac{\sum_{j \in B} Гп.q_j \cdot (Гп.T_j' - Гп.T)}{Oo.m}, B \subset \{1,2\}, B = \{j q_j > 0\}$
+Гу+Вж+Оо+Та	вида (12): $Гу.T = Та.T$ $Та.P[Гу] = Вж.c \cdot \left(\sum_{j \in B} Гу.q_j \cdot (Гу.T_j' - Та.T) - Гу.m_t \cdot Та.T \right),$ $B = \{j q_j > 0\}$
+Гп+Вж+Оо+Та	вида (12): $Гп.T = Та.T$ $Та.P[Гп] = Вж.c \cdot \left(\sum_{j \in B} Гп.q_j \cdot (Гп.T_j' - Та.T) - Гп.m_t \cdot Та.T \right),$ $B \subset \{1,2\}, B = \{j q_j > 0\}$

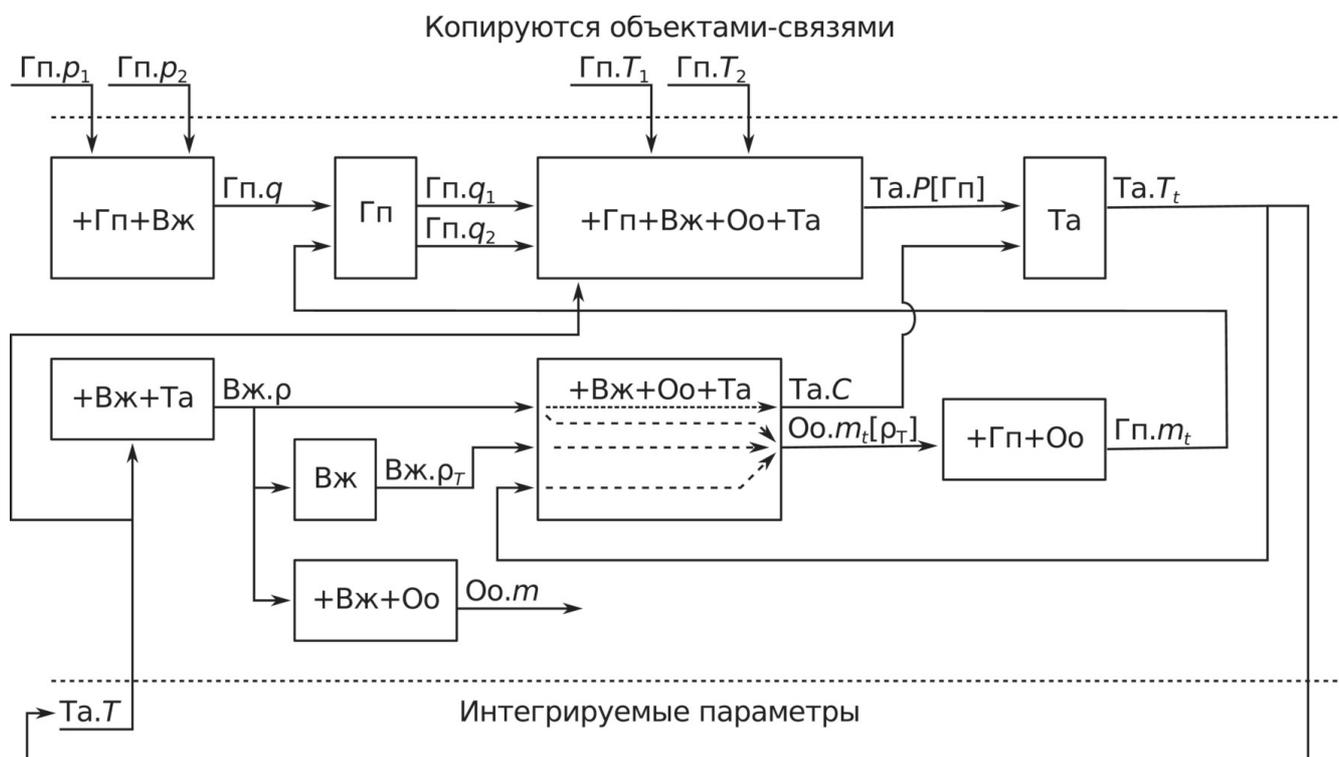


Рис. 4. Решение явных алгебраических уравнений для комбинации фрагментов «+Гп+Вж+Оо+Та»

параметр $O_o.V$ изменялся в соответствии с разностью масс втекающей и истекающей РЖ:

$$O_o.\dot{V} = \frac{\sum_j \Gamma_{y.j} q_j}{V_{ж.р}} \quad (15)$$

Давление, создаваемое компенсатором, рассчитывалось в соответствии с уравнением состояния идеального газа:

$$\Gamma_{y.p} = \frac{p_0 \cdot (V_k - V_0)}{V_k - O_o.V}, \quad (16)$$

где V_k — полный объем компенсатора, включая и газовую и жидкостную полости; V_0 — начальный объем РТ в компенсаторе; p_0 — давление, создаваемое компенсатором при объеме РТ, равном V_0 .

В модели компенсатора были разработаны подпрограммы для решения явного алгебраического уравнения (16) и дифференциального уравнения (15).

Модель насоса представляла собой одну ПМ, включающую комбинацию фрагментов «+Гп+Вж». Параметр $\Gamma_{y.\Delta p_{ext}[насос]}$ для этой ПМ устанавливался в константное, отличное от нуля, значение, чем обеспечивалось моделирование работы насоса, порождающее движение РТ.

Регулятор расхода жидкости моделировался как набор ПМ, соединенных ОС (рис. 5), а движение заслонки было реализовано как синхронное изменение параметров $\Gamma_{y.g}$ ПМ «i» и «ii», моделирующих выходные трубы в наружную и внутреннюю части контура СТР.

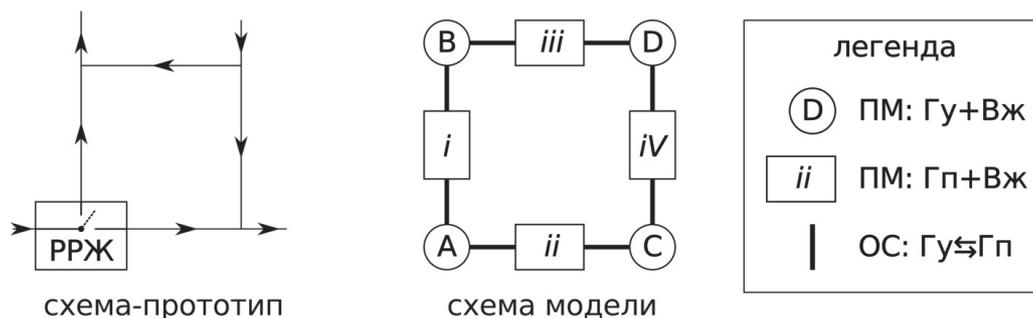


Рис. 5. Моделирование РРЖ

3. Моделирование работы исследуемой системы

3.1. Краткое описание расчетной программы

Для моделирования была разработана программа на языке Python3. В состав программы входила библиотека стандартных элементов — фрагментов и компонентов, подпрограмма для чтения конфигурации модели из специального файла и набор универсальных подпрограмм для осуществления вычислений.

Библиотека стандартных элементов, за исключением описания фрагментов «Та» и «Тк», была разработана в рамках настоящей работы и включала структуры данных, описывающие используемые фрагменты и компоненты, и подпрограммы, обеспечивающие решение уравнений в соответствии с данными табл. 1 и 2. Фрагменты «Та» и «Тк» были разработаны авторами в рамках [6].

Подпрограмма чтения конфигурации модели была разработана в рамках настоящей работы и обеспечивала считывание из текстового файла в формате YAML структуры модели — используемых компонентов из библиотеки стандартных элементов и ОС, соединяющих эти компоненты. Пример конфигурационного файла приведен в листинге 1.

Универсальные подпрограммы для осуществления вычислений были разработаны авторами в рамках [6] на базе библиотеки стандартных подпрограмм SciPy для языка Python3. Разработанные подпрограммы выполняли решение явных алгебраических уравнений, подготовку данных для стандартной подпрограммы решения неявных алгебраических уравнений из библиотеки SciPy и численное интегрирование методом Эйлера.

3.2. Результаты моделирования

В рамках работы производилось моделирование первоначального запуска схемы управления РРЖ после выведения КА на орбиту. Моделируемый процесс характеризуется повышенным нагревом РЖ во внутренней части контура и пониженной температурой РЖ во внешней части контура. При включении схемы управления РРЖ производилось резкое открытие РРЖ до тех пор, пока значение температуры в области ДТЖ не приходило в рабочий интервал $[T_1, T_2]$; после этого открытие РРЖ прекращалось. Во время последующей работы более холодная РЖ поступала во внутреннюю часть контура СТР, что приводило к плавному закрытию РРЖ до номинального значения. Положение зас-

Листинг 1. Пример файла с описанием модели

```

модель: # компонент высшего уровня иерархии — вся модель
комп: # здесь перечислены компоненты, входящие в модель
СТР: # компонент — система терморегулирования
# класс компонента не указан,
# значит отсутствуют специфичные параметры и подпрограммы
комп: # компоненты, входящие в состав «СТР»
зр: # модель ЗР
    кл: трубка # класс компонента
        # специфичные для класса компонентов параметры
    п: { g: 0.2e-10, T: 300.0, V: 28.0e-3 }
н2: # модель Н2
    кл: насос
    п: { T: 300.0, dp0: 0.6e5, q0: 1.0 }
зрн2: # модель соединения Н2 и ЗР
    кл: узел
    п: {}
к1: # модель К1
    кл: компенсатор
    п: { V0: 3.0e-3, Vfull: 6.0e-3, p0: 0.5e5 }
...
ос: # ОС, связывающие компоненты, входящие в состав «СТР»
- пм: [ [ зрн2, А ], [ зр, А ] ] # соединяет ПМ зрн2.А и зр.А
ин: # связи по принадлежности к физическим взаимодействиям
    Г: # для фрагментов, моделирующих гидродинамику:
        [ 1, 1 ] # имена контактов для фрагментов указанных ПМ
- пм: [ [ н2, А ], [ зрн2, А ] ]
ин: { Г: [ 2, 1 ] }
...

```

лонки РРЖ и изменение температур в таком сценарии показаны на рис. 6.

где T — температура радиатора; M — орбитальная аномалия; σ — постоянная Стефана—Больцмана;

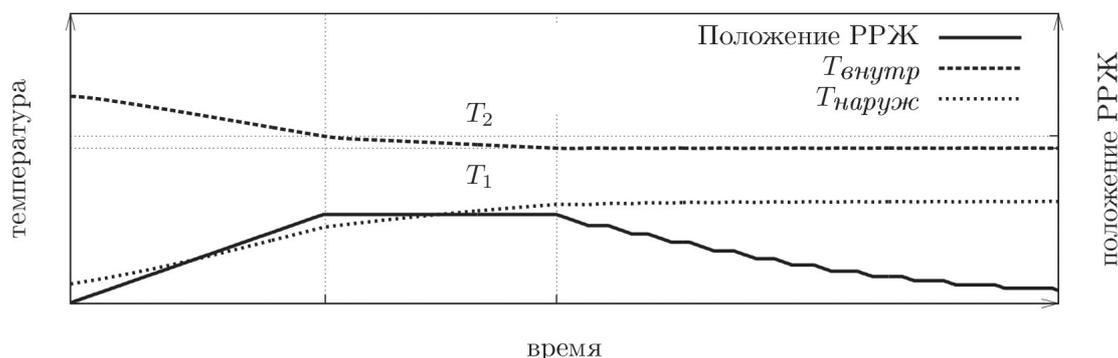


Рис. 6. Работа РРЖ после выведения

Также производилось моделирование номинальной работы СТР. Рассчитывалась передача тепла от теплосъемников агрегатов к ЗР при периодическом изменении освещенности радиатора.

Поток тепла, поступающий на T_1 и T_2 , считался постоянным и равным Q_1 и Q_2 соответственно. Поток тепла, излучаемый с радиатора, зависел от температуры радиатора и от плотности потока излучения внешних тел — Земли и Солнца. Для упрощения расчетов освещенность радиатора Солнцем при движении по орбите принималась равной константе для орбитальной аномалии $M \in [0, m_1)$ и нулю для $M \in [m_1, 2\pi)$. Под орбитальной аномали-

E_3 — плотность потока излучения Земли; E_C — плотность потока излучения Солнца; α — коэффициент поглощения радиатора.

Положение заслонки РРЖ и процессы изменения температур в наружном и внутреннем контуре в течение моделирования данного сценария показаны на рис. 7.

Одной из важных характеристик жидкостных контуров СТР является зависимость давления в контуре от температуры РТ, по которой определяют наличие утечек в контуре. Такая зависимость, полученная при моделировании работы СТР, приведена на рис. 8.

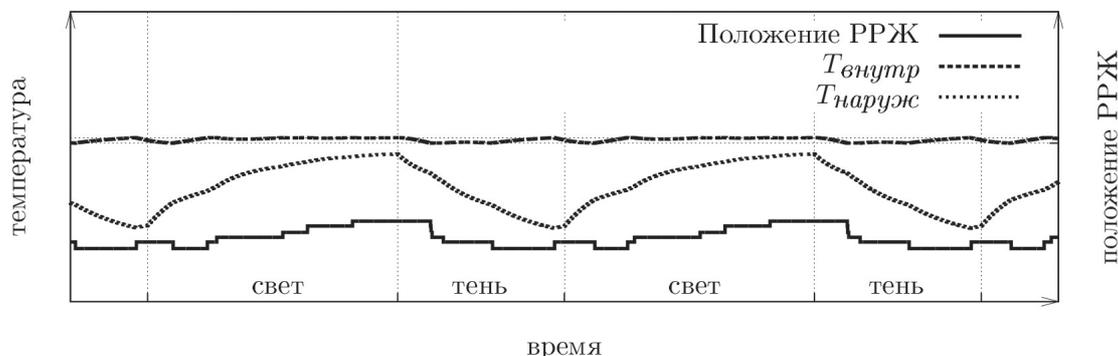


Рис. 7. Работа РРЖ при изменении освещенности

ей понимается угловое расстояние между перицентром орбиты и текущим положением тела (см., например, [10]). Радиатор считался сферой с площадью S ; поток тепла, излучаемый с радиатора, рассчитывался по формуле

$$Q_{\text{вых}}(T, M) = \sigma S T^4 - \frac{1}{4} S \alpha \left(E_3 + \begin{cases} E_C, & M \in [0, m_1) \\ 0, & M \in [m_1, 2\pi) \end{cases} \right), \quad (17)$$

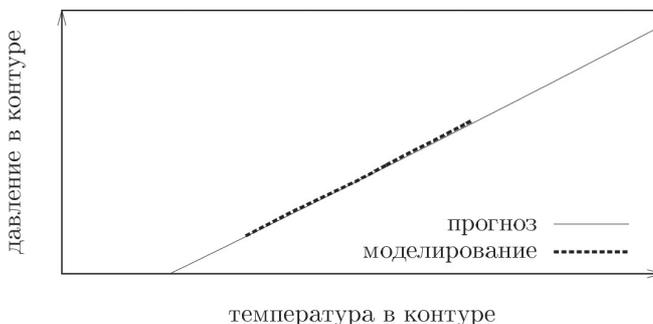


Рис. 8. Зависимость давления в контуре от температуры РТ

Результаты моделирования хорошо согласуются с телеметрическими измерениями, получаемыми с реальных КА в ходе полета.

Выводы

В настоящей статье для разработки модели системы терморегулирования применяется метод, использующий трехстадийную декомпозицию. Вначале в соответствии со схемой деления модель разбивается до уровня элементов, затем модель каждого элемента разбивается на модели простых деталей, а каждая такая модель — на фрагменты, описывающие свойства детали с точки зрения определенной физической природы. Трехстадийная декомпозиция позволяет представить модель исследуемой системы в виде конечного набора универсальных стандартных элементов, каждый из которых обладает фиксированным набором параметров и относительно простых уравнений, связывающих эти параметры. Структура модели задается с помощью специальных объектов. Полученная система уравнений решается известными численными методами.

В рамках работы была создана библиотека стандартных элементов — фрагментов и компонентов — для моделирования жидкостных контуров систем терморегулирования космических аппаратов, дано подробное описание этих стандартных элементов. Приведены результаты моделирования характерных процессов, происходящих в бортовой СТР.

Разработанная библиотека универсальных стандартных элементов может использоваться для моделирования систем терморегулирования реальных космических аппаратов, имеющих схожие принципы функционирования.

В работе используется универсальное описание процесса течения рабочего тела по трубопроводам бортовой системы, разработанное авторами ранее. Свойства рабочего тела принимаются соответствующими несжимаемой жидкости, а течение — ламинарным, однако изложенный подход позволяет описывать и другие типы течения рабочего тела с различными уравнениями состояния. Так, например, возможно использовать формулы, принятые в инженерной практике (см., например, [11]).

Примененный подход позволяет создавать модели всех служебных бортовых систем космических аппаратов из составных элементов — компонентов и фрагментов. В связи с этим представляется воз-

можным разработать программный пакет — среду разработки имитационных моделей служебных бортовых систем КА, в основе работы которой будет лежать используемый метод моделирования. По сравнению с классическим подходом к моделированию такая среда разработки позволит в течение более короткого срока разрабатывать более надежные модели, а следовательно, значительно удешевить процесс разработки имитационных моделей бортовых систем космических аппаратов.

Библиографический список

1. Соловьёв В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полётами. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 902 с.
2. Paynter H. Analysis and design of engineering systems. — Cambridge, Mass.: M.I.T. press, 1961. — 303 p.
3. Mukherjee A., Karmakar R. Modelling and simulation of engineering systems through bondgraphs. — Pangbourne, UK: Alpha Science Int'l Ltd., 2000. — 470 p.
4. Mukherjee A., Samantaray A.K. Bond graph in modeling, simulation and fault identification. — New Delhi, India: I.K. International Pvt. Ltd., 2006. — 512 p.
5. Щербина О.А. Краткое введение в AMPL-современный алгебраический язык моделирования. — 2012. — URL: <http://soa7.socionet.ru/files/AMPL.pdf>.
6. Петров Д.С. Имитационное моделирование двигательной установки космического аппарата при помощи трехстадийного метода декомпозиции // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. №1. С. 43-57.
7. Белова В.В. Оперативный контроль телеметрических параметров системы теплового режима транспортных грузовых и пилотируемых кораблей на этапе комплексных электрических испытаний // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2012. №1. С. 50-58.
8. Петров Д.С. Моделирование течения жидкостей и газов по трубопроводам при помощи трехстадийного метода декомпозиции // Материалы конференции «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014) / ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон». — СПб., 2014. С. 583-590.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. — М.: Наука, 1986. Т. VI. Гидродинамика. — 736 с.
10. Дубошин Г.Н. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. — 889 с.
11. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчет пневмоприводов: Справочное пособие. — М.: Машиностроение, 1975. — 272 с.

USE OF THREE-STAGE DECOMPOSITION METHOD FOR SIMULATION OF SPACECRAFT THERMAL CONTROL SUBSYSTEM

Pavlov D.V.* , Petrov D.S.**

Rocket-Space Corporation "Energia",
4A, Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia

* e-mail: dmitripavlov@inbox.ru

** e-mail: dmitry.s.petrov@engineer.com

Abstract

The article is devoted to simulation of a spacecraft thermal control system with the use of new simulation paradigm. The paradigm is based on three-stage decomposition method, which has been proposed by the authors. The thermal control system under consideration follows the same principles as the on-board systems of real spacecraft like "Soyuz TMA-M" and "Progress-M".

At the first stage the hierarchical decomposition is made according to the spacecraft dividing circuit. As a result, the system is divided into parts, which models are named *components*. Components are nested into each other and establish a hierarchy similar to the dividing circuit.

At the second stage the interface decomposition is made when interface entities are picked out in every *component* prototype. Models of such entities are named *simple models* (SM).

At the third stage the interactional decomposition is made when each SM prototype is considered as a member of various physical interactions. Each SM is composed of set of *fragments* that represent the SM prototype involvement in interaction of specific physical domain. Each *fragment* is an object that contains the SM prototype parameters related to the physical domain. Additionally, the number of subroutines is assigned to each *fragment* that calculates relations between the parameters.

While modeling the various links between parameters of different *fragments* of the same SM are taken into account. That links are named *cross-fragment links* and implemented with particular subroutines each of which corresponds to the unique *fragments* combination.

Simulation model structure is defined with particular objects *bonds*. Each *bond* joins two SMs. *Bonds* declare copying of parameters between fragments of linked SMs.

In this paper the creation of universal standard elements library is considered. The library includes, firstly, the *fragment classes* definition, which are used for simulation of fluid flow through spacecraft subsystem pipelines, secondly, subroutines for simulation of relationship between heat and hydrodynamic domains, thirdly, *bond* definition, and, finally, the description of

component classes used for spacecraft thermal control subsystem simulation.

The main feature of the library is a wide use of *cross-fragment links* that makes the flexibility of designed *fragments* possible. For instance, any pipeline for gas flow including heat transfer as well as for liquid isothermal flow is simulated with the use of the same *fragments* that define pipeline geometric properties. The flow of particular substances is simulated using, firstly, special *fragments* that define substance properties and, secondly, *cross-fragment links* between *fragments* of hydrodynamic, thermal and substantial physical domains.

By means of this library the simulation model of a spacecraft thermal control system was designed. The results of the typical processes of simulation have been obtained; the conclusion about the correspondence of the calculations results to the real spaceship telemetry data has been made.

The library can be used for simulation of real spacecraft thermal control system with a similar design and operating principle. The library may also be expanded for simulation of various flow processes of different substances of various states, what allows to simulate another spacecraft onboard subsystems like life support system.

Keywords: simulation, spacecraft, thermal control system, three-stage decomposition

References

1. Belova V.V. *Vestnik FGUP "NPO im. S.A. Lavochkina"*, 2012, no. 1, pp. 50-58.
2. Duboshin G.N. *Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoi mekhanike i astrodinamike* (Guide on celestial mechanics and astrodynamics), Moscow, Nauka, 1976, 889 p.
3. Gerts E.V., Kreinin G.V. *Raschet pnevmoprivodov* (Handbook for pneumatic devices calculation), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 272 p.
4. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika* (Course of theoretical physics), Moscow, Nauka, 1986, vol. VI, 736 p.
5. Mukherjee A., Karmakar R. *Modelling and simulation of engineering systems through bondgraphs*, Pangbourne, UK, Alpha Science Int'l Ltd., 2000, 470 p.

6. Mukherjee A., Samantaray A. K. *Bond graph in modeling, simulation and fault identification*, New Delhi, India, I.K. International Pvt. Ltd., 2006, 512 p.
7. Paynter H. *Analysis and design of engineering systems*, Cambridge, Massachusetts, M.I.T. press, 1961, 303 p.
8. Petrov D. S. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 43-57.
9. Petrov D.S. *Materialy konferentsii "Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh" (UMAS-2014)*, St. Petersburg, 2014, pp. 583-590.
10. Shcherbina O.A. *Kratkoe vvedenie v AMPL-sovremennyyi algebraicheskii yazyk modelirovaniya*, 2012, available at: <http://soa7.socionet.ru/files/AMPL.pdf>, 29 p.
11. Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskii V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* (Space mission control), Moscow, MGTU im. N. E. Baumana, 2009, 902 p.