

В. Н. Блинов, С. С. Валеев, Т. В. Исламгулов,  
Р. Р. Каримов, В. В. Косицын, В. И. Рубан

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МИКРОСПУТНИКА НА ОСНОВЕ СКВОЗНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассматривается малый космический аппарат как объект исследования, выделены проблемы сквозной информационной поддержки жизненного цикла малых космических аппаратов. На примере двигательной установки малого космического аппарата решена задача повышения точности оценки ресурсов и технического состояния на основе сквозной интеллектуальной модели. *Малый космический аппарат; жизненный цикл; двигательная установка; нейронная сеть; сквозная модель, интеллектуальная модель*

На сегодняшний день одним из направлений развития космических технологий является широкое использование малых космических аппаратов (МКА) в научных и коммерческих целях. Анализ рынка космических услуг показывает, что в зарубежных и российских космических программах преобладают малые космические аппараты, предназначенные для низкоорбитальных систем связи, зондирования Земли, исследования околоземного космического пространства, реализации космических технологий. Рост интереса к малым космическим аппаратам в значительной степени объясняется такими их преимуществами, как низкая стоимость, оперативность создания и развертывания, возможность быстрой реакции на новейшие научно-технические достижения и потребности рынка.

Одной из нерешенных проблем в настоящее время остается создание сквозных систем информационной поддержки жизненного цикла космических аппаратов, что имеет особую актуальность для МКА, так как сроки их активного существования относительно невелики и имеют место существенные факторы неопределенности в процессе проектирования, производства и эксплуатации [1]. Авторами разработана нейросетевая модель двигательной установки МКА, позволяющая решить ряд проблем, связанных с оценкой запаса топлива и технического состояния в условиях неопределенности. Данная нейросетевая модель является составной частью системы информационной поддержки ЖЦ МКА. С точки зрения авторов, одним из путей решения данной проблемы является использование нейронных сетей и интеллектуальных алгоритмов для разработки сквозных информационных моделей бортовых систем и МКА.

### 1. МАЛЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

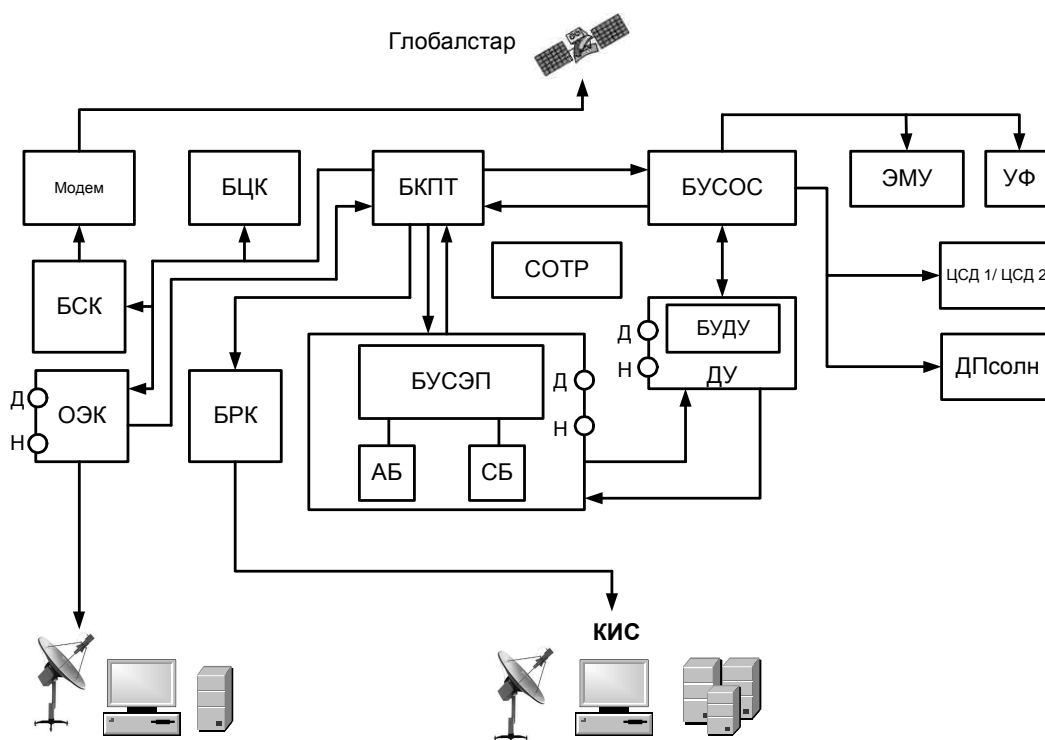
МКА является сложным техническим объектом, в структуре которого выделяется полезная нагрузка (например, система дистанционного зондирования) и служебные подсистемы, обеспечивающие процесс целевого функционирования. Состав малого космического аппарата приведен на рис. 1.



Рис. 1. Состав малого космического аппарата

Требования высокой надежности и функциональности бортового комплекса МКА связаны со сложной орбитальной обстановкой и условиями жесткого реального времени в процессе запуска и эксплуатации. Сложность структурно-функционального взаимодействия между бортовыми системами обусловлена необходимостью соблюдения большого числа требований и строгой координации процессов.

Взаимодействие бортовых систем осуществляется на основе распределенной сетевой архитектуры, реализующей принципы автономности и открытости [2].



**Рис. 2.** Архитектура взаимосвязей бортовых систем в составе комплекса жизнеобеспечения МКА: ОЭК – оптико-электронный комплекс; БЦК – блок центрального контроллера; БРК – блок радиоканала; БСК – блок сопряжения каналов; БКПТ – блок коммутации питания и телеметрии; БУСЭП – блок управления системой электропитания; АБ – аккумуляторная батарея; СБ – солнечная батарея; БУСОС – блок управления системы ориентации и стабилизации; УФ – узел феррозондовый; ЦСД – цифровой солнечный датчик; ДП<sub>солн</sub> – датчик положения Солнца; ЭМУ – электромагнитное устройство; БУДУ – блок управления двигательной установкой; СОР – система обеспечения тепловых режимов; Д – датчик температурный; Н – нагреватель

Архитектура бортового комплекса МКА приведена на рис. 2.

Обмен информацией МКА с внешней средой происходит по двум каналам: каналу передачи целевой информации, например, данных дистанционного зондирования, и каналу обмена командно-телеметрической информацией. В ЦУП потоки телеметрии и целевой информации принимаются и обрабатываются отдельно с помощью соответствующих аппаратно-программных комплексов.

В процессе функционирования МКА возникает необходимость обработки и хранения больших массивов информации, которая может быть использована для повышения эффективности управления полетом и выполнения целевых операций. Для поддержки принятия решений при эксплуатации МКА возникает необходимость привлечения дополнительной информации о предыдущих этапах жизненного цикла (ЖЦ) – проектировании, изготовлении, запуске.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МКА

Этапы ЖЦ МКА во многом схожи с этапами ЖЦ сложного технического объекта. Жизненный цикл малых космических аппаратов включает этапы выбора облика, проектирования, изготовления, запуска, эксплуатации и утилизации. Эффективная эксплуатация МКА должна быть обеспечена в течение ограниченных сроков его активного существования (САС). На сегодняшний день САС не превышает 3–5 лет.

К особенностям ЖЦ малых спутников относятся факторы уникальности, сокращения длительности этапов ЖЦ, невозможности технического обслуживания и ремонтных работ, отсутствия непосредственного визуального контакта с объектом в процессе эксплуатации и др. Сложность процесса эксплуатации МКА связана с целым рядом действующих факторов неопределенности – возникновение отказов бортового программного и аппаратного обеспечения, возможность утечки топлива и его химического

разложения в процессе полета, повреждение элементов аккумуляторной и солнечной батарей и др. Кроме того, существует неопределенность, обусловленная неполнотой получаемой диагностической информации, многообразием процессов, происходящих на борту МКА, а также действием помех. Кривые полезного эффекта и затрат на этапах ЖЦ МКА приведены на рис. 3.

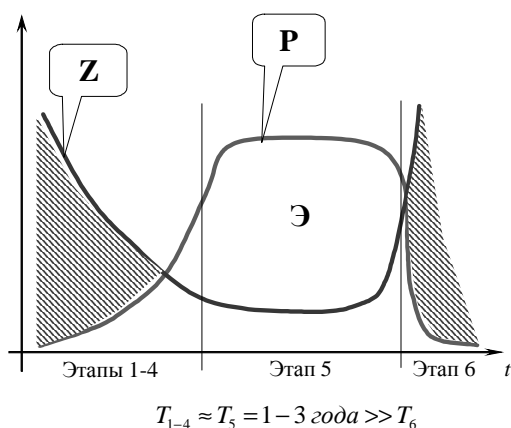


Рис. 3. Полезный эффект и затраты на ЖЦ МКА

Целевая эффективность ЖЦ МКА может оцениваться интегрально на основе сквозных математических моделей ЖЦ. С помощью сквозных математических моделей определяется оптимальный вариант целевой операции, обеспечивающий максимальный интегральный эффект не только для рассматриваемой операции, но и для всего жизненного цикла в целом:

$$\mathcal{E}(t) = \int_0^t (P(t) - Z(t)) dt \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}(t)$  – целевая эффективность,  $P(t)$  – суммарный полезный эффект,  $Z(t)$  – суммарные затраты на этапах ЖЦ.

Эксплуатация МКА протекает в удаленных условиях, на орбите, в связи с чем актуальны средства моделирования процессов функционирования спутника для оценки орбитальной обстановки и поддержки принятия решений по управлению микроспутником в режиме реального времени [3]. Повышение эффективности эксплуатации и целевого использования МКА требует создания интегрированного аппаратно-программного комплекса информационной поддержки жизненного цикла (ЖЦ) МКА в составе

Центра управления полетом (ЦУП) МКА [4]. Система информационной поддержки ЖЦ МКА предназначена как для использования сотрудниками центра управления полетом (ЦУП), так и территориально удаленными техническими экспертами и пользователями космической информации в распределенном режиме. Схема работы системы информационной поддержки представлена на рис. 4.

Кроме традиционных технических задач поддержки функционирования МКА, сбора и обработки космической и телеметрической информации такая система должна обеспечивать:

- поддержку принятия решений оператором ЦУП в штатных и нештатных ситуациях на основе средств доступа к данным об изделии, современных интеллектуальных средств визуализации и аналитической обработки данных;
- оценку остаточного ресурса и других параметров ЖЦ МКА в целом для оперативного анализа эффективности ЖЦ и прогнозирования возможных отрицательных последствий и рисков;
- оперативный обмен данными с территориально удаленными экспертами для эффективного управления МКА;
- гибкую и дружественную поддержку пользователей космической информации на основе средств глобальных сетей.

Для решения задач информационной поддержки жизненного цикла МКА создается комплекс компьютерных моделей МКА, включая 3D-модели конструкции МКА и его систем управления, информационные модели производственного процесса, виртуальные 3D-модели процессов эксплуатации МКА, модели логистических цепей поставок при взаимодействии проектантов, производителей, эксплуатантов МКА и потребителей целевой информации. В состав системы информационной поддержки ЖЦ МКА входят следующие подсистемы: подсистема сбора и обработки информации, подсистема трехмерного моделирования и визуализации, а также подсистема оценки ресурсов и состояния МКА. Схема взаимодействия подсистем представлена в виде диаграммы активности, которая приведена на рис. 5.



Рис. 4. Схема работы системы информационной поддержки в процессе эксплуатации

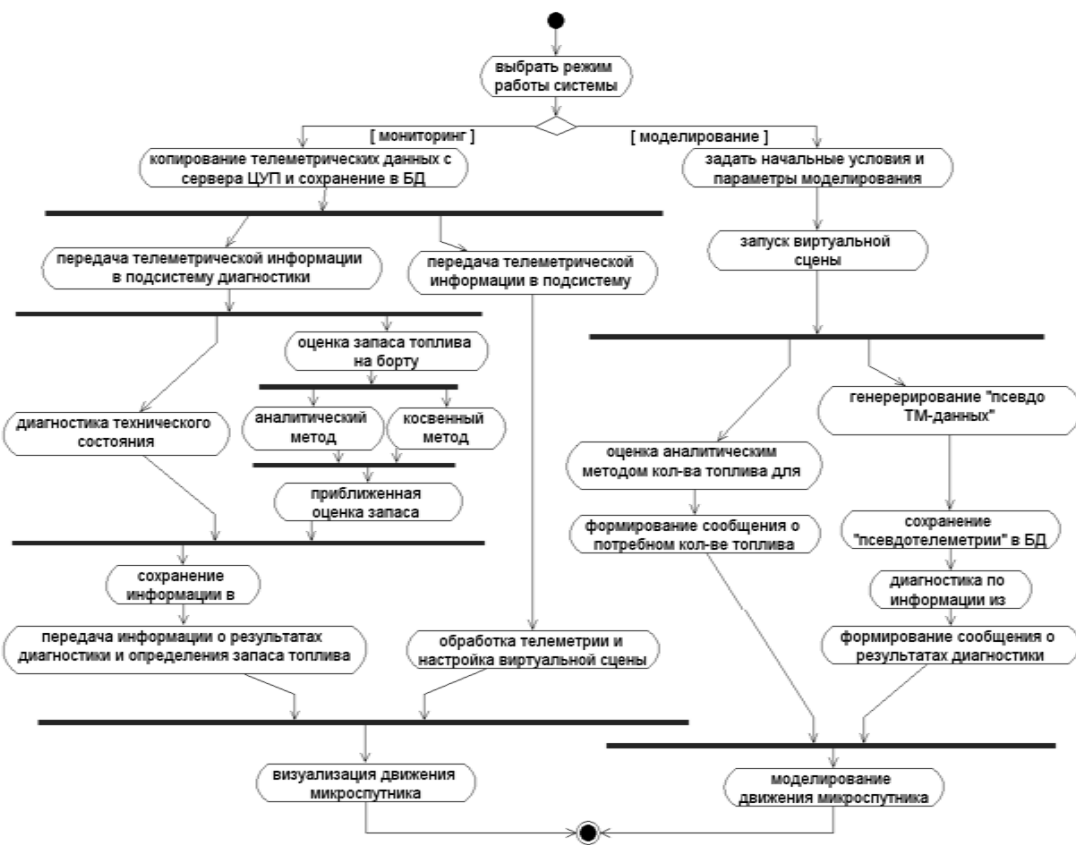


Рис. 5. Схема взаимодействия подсистем в составе системы информационной поддержки ЖЦ МКА

### 3. ПОДСИСТЕМА ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ И СОСТОЯНИЯ ДУ МКА НА ОСНОВЕ СКВОЗНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим подсистему оценки ресурсов и состояния на примере двигательной установки (ДУ), которая предназначена для коррекции орбитального положения МКА. В состав двигательной установки входят топливный бак цилиндрической формы, фильтр, электропневмоклапан, испаритель для перевода жидкого аммиака в газообразное состояние, регулятор давления для поддержания заданной величины давления, а также сам электротермический двигатель. Рассматриваемая ДУ разработана в ПО «Поле́т» (г. Омск) и используется на российских и зарубежных микроспутниках.

Основным невозобновляемым ресурсом на борту МКА является запас топлива. Задача определения запаса топлива на борту КА является весьма актуальной в связи с отсутствием датчика топлива, экстремальными внешними условиями, невозможностью дозаправки и других видов обслуживания. К факторам неопределенности можно отнести возникновение отказов компонентов ДУ, потери топлива вследствие негерметичности, химическое разложение топлива и др. Принципиальная пневмогидравлическая схема ДУ приведена на рис. 6.

Ключевой особенностью рассматриваемой двигательной установки является формирование импульсов тяги малой величины и работа в режиме «холодного запуска», вследствие чего величина тяги и расход топлива являются функциями времени [5]. Для рассматриваемых микродвигателей отсутствуют аналитические модели, позволяющие с необходимой точностью определять техническое состояние ДУ, расход топлива и его запасы. В то же время в процессе проектирования и испытаний накапливается значительный объем расчетной и экспериментальной информации, которая может быть использована для создания интеллектуальной мо-

дели ДУ на основе нейронных сетей. В процессе эксплуатации такая модель позволит решать следующие задачи: оценивать запасы топлива на борту; диагностировать техническое состояние ДУ и обнаруживать его отказы; определять расход топлива, необходимый для совершения орбитального маневра. В процессе моделирования используется телеметрическая информация, параметры программы управления, в том числе уставки режимов работы ДУ, данные о предыдущих включениях микродвигателя. Фрагмент списка используемых параметров и их описание представлены в табл. 1.

Для построения модели ДУ всю информацию разобьем на две группы. Первая группа – входные данные  $X$ :

$$X = \{T_{\max \text{ НД}}, T_{\max \text{ НИ}}, P_{\max \text{ НД}}, P_{\max \text{ НИ}}, S, U_{\text{НД}}, I_{\text{НД}}, U_{\text{НИ}}, I_{\text{НИ}}, t_{\text{ЭПК}}, t_{\Sigma}, t_{\text{N}}\}, X \in R^{12}.$$

Вторая группа – группа выходных данных  $Y$ :  $Y = \{T_{\text{НД}}, T_{\text{НИ}}, p\}, Y \in R^3$ . Входные данные подаются на ДУ для формирования импульса тяги, а выходные – позволяют оценивать величину импульса тяги [6]. В силу сложности и разнообразия решаемых задач – диагностика состояния микродвигателя, определение запаса и расхода топлива, необходимого для выполнения орбитального маневра, предлагается использовать комплекс нейронных сетей. Разработанная нейросетевая модель включает в себя 3 нейронных сети – НС1, НС2, НС3.

Все разработанные нейронные сети представляют собой многослойные перцептроны, обученные по методу обратного распространения ошибки. В качестве обучающей выборки использованы расчетные и экспериментальные данные, полученные на этапах проектирования и испытаний ДУ. Структура нейронных сетей приведена в табл. 2. Нейронная сеть НС1 предназначена для определения зависимости выходной информации  $Y$  от входной  $X$  и используется в режиме моделирования работы ДУ МКА.

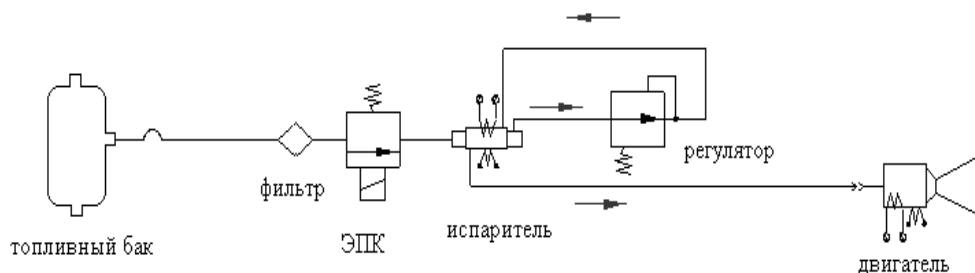


Рис. 6. Пневмогидравлическая схема электротермического микродвигателя

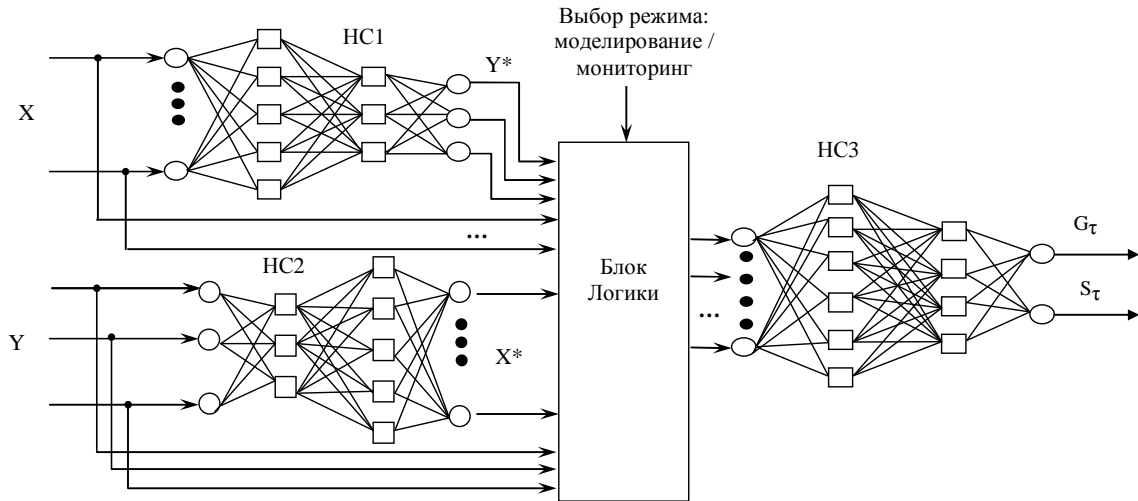


Рис. 7. Комплекс нейронных сетей

Таблица 1

Описание используемых параметров

Параметр	Описание
$T_{нд}$	температура на нагревателе двигателя
$U_{нд}$	напряжение на нагревателе двигателя
$I_{нд}$	ток на нагревателе двигателя
$T_{ни}$	температура на нагревателе испарителя
$U_{ни}$	напряжение на нагревателе испарителя
$I_{ни}$	ток на нагревателе испарителя
$N$	номер принятого блока с исходными данными (уставками)
$t_N$	значение счетчика приборного времени БУДУ
$p$	давление в камере двигателя
$T_{maxнд}$	максимальная температура нагревателя двигателя
$T_{maxни}$	максимальная температура нагревателя испарителя
$P_{maxнд}$	максимальная мощность электрического тока, подаваемого на нагреватель двигателя
$P_{maxни}$	максимальная мощность электрического тока, подаваемого на нагреватель испарителя
$t_{ЭПК}$	время подготовки к работе двигателя
$t_{\Sigma}$	время работы двигателя

Нейронная сеть НС2 решает обратную задачу и определяет зависимость входной информации  $X$  от выходной  $Y$ . Результаты работы нейросети НС2 используются в режиме мониторинга для решения задачи диагностики технического состояния ДУ МКА.

Таблица 2

Структура нейронных сетей

НС	Структура НС
НС1	12-5-3-3
НС2	3-3-5-12
НС3	15-6-4-2

Нейронная сеть НС3 используется для определения расхода топлива  $G_{\tau}$  и оценки технического состояния  $S_{\tau}$ . В НС3 в качестве входной информации используются потоки данных  $X$  и  $Y$ . Данные о расходе топлива, полученные в процессе испытаний ДУ, позволяют повысить точность и достоверность обучающей выборки.

Комплекс нейронных сетей на основе НС1, НС2 и НС3 приведен на рис. 7. В режиме моделирования работы ДУ МКА блок логики обеспечивает взаимодействие НС1 и НС3, а в режиме мониторинга – НС2 и НС3, что позволяет повысить точность оценки расхода топлива с использованием дополнительной информации о техническом состоянии ДУ. Сквозное применение интеллектуальной модели на различных этапах ЖЦ МКА представлено на рис. 8.

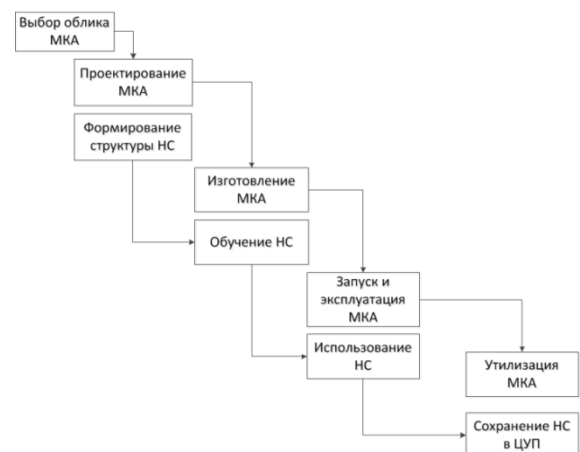


Рис. 8. Сквозное применение интеллектуальной модели на различных этапах ЖЦ МКА

Структура интеллектуальной модели формируется на этапе проектирования ДУ и МКА, в процессе которого определяется состав теле-

метрии и датчиков на борту. Далее, на этапе изготовления, модель обучается с использованием результатов испытаний микродвигателя. Таким образом, на этапе эксплуатации имеется уже обученная интеллектуальная модель ДУ МКА, с помощью которой проводится оценка расхода топлива и технического состояния во время полета. Эксперимент по обучению интеллектуальной модели и определению запаса топлива показал, что точность решения рассматриваемой задачи увеличилась на 10 % по сравнению с аналитическим методом.

### ВЫВОДЫ

Разработан комплекс нейронных сетей, который может быть использован в качестве сквозной интеллектуальной модели двигательной установки МКА для повышения точности оценки запасов топлива и технического состояния. Разработанный комплекс нейронных сетей может быть использован в составе наземных средств информационной поддержки ЖЦ МКА. Для поддержки принятия решений операторов ЦУП интеллектуальная модель может использоваться совместно с подсистемами визуализации, сбора и обработки данных. Предложенные принципы разработки и применения сквозной интеллектуальной модели могут быть использованы для построения моделей других бортовых систем и МКА в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каримов Р. Р., Кабальнов Ю. С., Кондратьева Н. В.** Информационная поддержка управления системами жизнеобеспечения космических аппаратов: Учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 156 с.
2. Система информационной поддержки жизненного цикла малого научно-образовательного космического аппарата / Р. Р. Каримов [и др.] // Сб. тр. 11-й междунар. конф. CSIT. 2009. Т. 3. С. 22–28.
3. **Каримов Р. Р., Исламгулов Т. В.** Система оценки ресурсов и состояния малого научно-образовательного космического аппарата // Решетневские чтения: Сб. тр. конф. Красноярск: СибГАУ, 2009. Ч. 2. С. 586–587.
4. **Каримов Р. Р., Кондратьева Н. В.** Системы информационной поддержки жизненного цикла космических аппаратов: Учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 151 с.
5. **Блинов В. Н., Рубан В. И.** Исследование динамики запуска электротермических микродвигателей на газообразном аммиаке // Динамика систем, механизмов и машин: Матер. VII междунар. науч. конф. Омск, 2009. С. 171–177.
6. **Беляев Н., Белик Н., Уваров Е.** Реактивные системы управления космических летательных аппаратов. М. Машиностроение, 1979 г. 232 с.

### ОБ АВТОРАХ



**Блинов Виктор Николаевич**, проф., зам. гл. констр. по проектн. работе, нач. проектн. комплекса ПО «Полет» – фил. ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». Дипл. инж.-мех. по произв-ву летательн. аппаратов (КАИ, 1976). Д-р техн. наук по проектир., констр. и произв. летательн. аппаратов, (Омск. ГТУ, 2000). Иссл. в обл. ракетно-космической техники.



**Валеев Сагит Сабитович**, проф. каф. инф. Дипл. инж.-электромех. (УГАТУ, 1980). Д-р техн. наук по системн. анализу и упр-ю (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. интеллектуальных систем управления.



**Исламгулов Тимур Винерович**, асп. той же каф. Дипл. инж. по моделир. и иссл. операций в орг.-техн. системах (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. диагностики сложн. техн. объектов.



**Каримов Ринат Равильевич**, доц. той же каф. Дипл. инж.-системотехник (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук по системам обр. инф. и упр-я (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. интеллект. информационных систем.



**Косицын Валерий Владимирович**, вед. специалист ПО «Полет» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева». Дипл. инж.-мех. по ракетостр. (Омск. ГТУ, 2001). Иссл. в обл. ракетно-космической техники.



**Рубан Виктор Николаевич**, вед. спец. ПО «Полет» – филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева». Дипл. инж.-мех. по летательн. аппаратам (МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1976). Иссл. в обл. ракетн.-космическ. техники.