
Лоскутов А.И., Клыков В.А., Столяров А.В. Полимоделный подход в задаче технического диагностирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов [Электронный ресурс] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал, 2017. № 5(39). – Режим доступа: http://iea.gostinfo.ru/files/2017_05/2017_05_08.pdf.

УДК 681.518.5

ПОЛИМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Лоскутов А.И., доктор технических наук, доцент, ФГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»

Клыков В.А., адъюнкт, ФГОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»

Столяров А.В., начальник отделения обслуживания и ремонта наземного оборудования технической базы войсковой части 13991

В статье рассмотрены вопросы математического моделирования процессов функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов (БРЭА КА) с целью создания специального математического обеспечения (СМО) автоматических бортовых систем диагностирования (АБСД) БРЭА КА в условиях автономного функционирования. Предложен полимоделный подход в решении задачи технического диагностирования, разработанного в рамках одного математического инструмента. Математическим аппаратом, формализующим процесс функционирования БРЭА КА с целью создания СМО АБСД предложен инструмент конечных автоматов. Разработан алгоритм технического диагностирования на основе полимоделного подхода формализации процесса функционирования БРЭА КА.

Ключевые слова: техническое диагностирование, контроль, космический аппарат, бортовая радиоэлектронная аппаратура, математическая модель, конечный-автомат, эпиморфизм.

POLYMODALLY APPROACH IN TECHNICAL DIAGNOSTICS OF THE ONBOARD AVIONICS DEVICES SPACECRAFT

Loskutov A.I., doctorate degree of technical sciences, assistant professor, Mozhaisky Military Space Academy.

Klykov V.A., graduated, Mozhaisky Military Space Academy.

Stolyarov A.V., head of Department maintenance and repair of ground equipment of the technical base of the military unit 13991.

In the article the questions of mathematical modeling of processes of functioning of the onboard avionics spacecraft with the purpose of creation of the special mathematical software of automatic on-Board diagnostic systems on-Board radioelektronnoi of spacecraft equipment in terms of Autonomous functioning. Polymodally proposed approach in solving tasks of technical diagnostics, developed in the framework of one mathematical tool. Mathematical apparatus formalizing the process of functioning of the onboard equipment space radioelektronnoi machinery to create special mathematical software of automatic onboard system of diagnostics of the proposed tool for finite state machines. The algorithm of technical diagnostics on the basis of polimodales approach of formalizing the process radioelektronnoi functioning of the onboard equipment of the spacecraft

Keywords: technical diagnostics, control, spacecraft, onboard electronics, mathematical model, finite automaton, epimorphism.

Введение

Создание перспективных космических аппаратов с высокими целевыми и эксплуатационными характеристиками требует разработки новых подходов к решению проблемы обеспечения работоспособности бортовых систем (как специальных, так и служебных). Важнейшим направлением решения данной проблемы является разработка и создание бортовых систем технического диагностирования [8, 9], которые позволят при достаточно низком уровне ресурсных затрат с требуемой максимальной достоверностью и полнотой оценивать техническое состояние бортовых систем, а также формировать воздействия по управлению в процессе его целевого применения. Разработка таких систем невозможна без математического моделирования

функционирования современной высокотехнологичной бортовой аппаратуры. В свою очередь пригодность модели определяется требованиями, которые зависят от той цели, ради которой строится данная модель, вследствие того, что задача построения модели является не самостоятельной, а подчиненной конкретным целям, определяемым системой, в которой используется построенная модель, например бортовая система технического диагностирования. Однако при применении адекватных математических моделей могут возникнуть трудности при синтезе алгоритмов контроля на основе данных моделей в виду большой размерности получаемых моделей, так называемое «проклятие размерности».

Постановка задачи разработки полимодельного подхода в задаче технического диагностирования

Из работы [1] известно, что задачами технического диагностирования БА КА являются контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), а также прогнозирование технического состояния.

Таким образом, в условиях автономного функционирования бортовой аппаратуры (БА) КА, когда система обладает обширным спектром ресурсных ограничений (временных, энергетических), задача математического моделирования может быть скорректирована или преобразована исходя из условий и целей оптимального решения задачи, вследствие которого и происходит непосредственно моделирование бортовой системы в рамках выбранных критериев. Например, для решения задачи контроля модель БА КА может быть синтезирована с целью минимизации времени контроля, но соответственно при ограничениях на достоверность, а для решения диагностирования (поиска места и причины неисправности) модель БА КА может быть построена с целью максимизации достоверности диагностирования, но, соответственно, при ограничениях на оперативность.

В общем случае применение математического аппарата для формализации процессов функционирования бортовой аппаратуры может быть различным, в том числе он может быть различным и для решения конкретных задач, будь то задача контроля, поиска места и причины неисправности или прогнозирования. Применение полимодельного подхода позволит проводить оптимизацию в плане выбранных показателей и критериев с целью наиболее эффективного решения задачи технического диагностирования. Однако на практике наиболее интересным представляется подход математического моделирования в рамках одного инструмента для решения всех трех задач технического диагностирования. С математической точки зрения данное утверждение может быть представлено следующим образом:

$$\gamma(F_m) \rightarrow \underset{F_m \in \Omega_F}{opt} \rightarrow F_m^* \quad (1)$$

или

$$F_m^* = \underset{F_m \in \Omega_F}{arg\ opt} \gamma(F_m) \quad (2)$$

где F_m – математический оператор, характеризующий процесс функционирования бортовой системы;

F_m^* – оптимальная оценка оператора F_m ;

γ – функция, характеризующая потери при определении оператора F_m^* по отношению к оператору F_m ;

Ω_F – класс (множество) допустимых операторов, характеризующих процесс функционирования бортовых систем под определенные задачи.

Обобщенная схема решения задач технического диагностирования в рамках одного математического инструмента представлена на рис. 1.

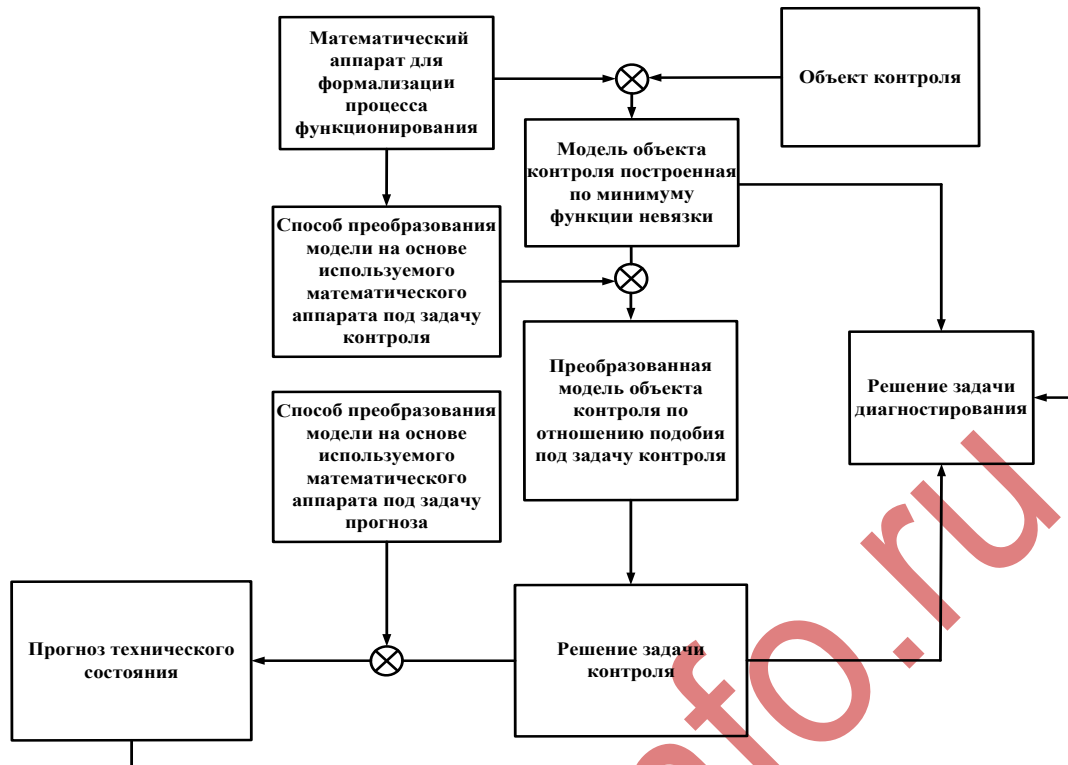


Рис. 1 Обобщенная схема решения задач технического диагностирования в рамках одного математического инструмента

Полимодельность в данном случае заключается в применении под разные задачи математических моделей, формализующих процесс функционирования объекта контроля и синтезированных в рамках одного математического инструмента.

Полимодельный подход в задаче технического диагностирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на основе математического аппарата конечных автоматов

Применительно к автономному режиму работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов, процесс функционирования БА удобно представлять с помощью математического аппарата конечных автоматов в виду простоты и адекватности данного инструмента при решении задачи идентификации с целью технического диагностирования.

Обычно конечный автомат описывается в виде упорядоченной пятерки [5]

$$A = \langle X, Y, Q, f, \varphi \rangle, \quad (3)$$

где X – множество входных воздействий (алфавит входных символов);

Y – множество выходных переменных (алфавит выходных символов);

Q – множество состояний;

$f: Q \times X \rightarrow Q$ – функция переходов;

$\varphi: Q \times X \rightarrow Y$ – функция выходов для автомата Мили (автомата 1-го рода).

Как было отмечено ранее задачами технического диагностирования БА КА являются контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности) и прогнозирование технического состояния. Ввиду специфики решения задачи прогнозирования технического состояния бортовой аппаратуры космического аппарата и невозможности полноценно отразить все многообразие решений этой задачи в рамках данной работы, далее будет рассмотрен подход к решению задачи контроля и диагностирования с применением математического инструмента (3).

Таким образом, построение математической модели бортовой радиоэлектронной аппаратуры автономных КА с целью технического диагностирования с применением математического аппарата конечных автоматов может быть разделено на несколько подзадач, а именно: построение модели с целью контроля и построение модели с целью диагностирования.

В свою очередь, каждое состояние конечно-автоматной модели (КАМ) характеризуется своим образом $q_i = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$, где $i = (\overline{1, n})$ в m -мерном пространстве. Из литературы [6] известно, что одним из направлений оптимизации решения задачи контроля с использованием КАМ является сокращение размерности пространства состояний путем нахождения обобщенных диагностических признаков:

$$h: Y \rightarrow Y' \Rightarrow Q': \text{card}(Q) \rightarrow \min, \text{card}(Y) > \text{card}(Y'), \quad (4)$$

В результате чего математическая конструкция (10) примет вид:

$$A_{min} = \langle X, Y', Q' | Q_{min}, f, \varphi \rangle. \quad (5)$$

Математическая конструкция вида (5) называется минимальной формой конечно-автоматной модели. В общем случае A_{min} является изоморфизмом по отношению к исходной полной конечно-автоматной модели A , так как преобразование происходит без потерь:

$$A_{min} \cong A, \quad (6)$$

Однако на практике реализовать соответствие (6) при построении модели (5) оказывается весьма затруднительно ввиду наличия потерь при преобразовании (4). В данном случае преобразование модели (3) в модель (5) будет являться эпиморфизмом [3], что в свою очередь и приведет к полимодельному подходу в решении задачи технического диагностирования

БРЭА КА:

$$f : A \rightarrow A_{min} \Rightarrow \begin{cases} f \in \text{Hom}(A, A_{min}) \\ m \circ f = h \circ f \Rightarrow m = h \end{cases} \quad (7)$$

где $m \circ f = h \circ f \Rightarrow m = h$ – условие эпиморфизма.

Таким образом первая подзадача технического диагностирования, применительно к рассматриваемому в работе математическому аппарату конечных автоматов, может быть решена синтезом модели вида (5). Однако в силу условия (7), данная модель может быть скорректирована, то есть задача построения модели БА КА для контроля ТС может быть осуществлена с целью нахождения оптимального значения показателя оперативности при ограничениях на достоверность:

$$F_{\kappa}^*(X) \Rightarrow f : A \rightarrow A_{min} \Rightarrow \begin{cases} T_{\kappa} \rightarrow T_{min}; \\ D \geq D_{треб}, \end{cases} \quad (8)$$

где $F_{\kappa}^*(X)$ – оператор модели синтезированной с целью решения задачи контроля технического состояния.

Вторая подзадача, а именно синтез модели с целью решения задачи оптимального по достоверности диагностирования, решается в рамках исходной полной конечно-автоматной модели (3):

$$F_{\text{д}}^*(X) \Rightarrow A \Rightarrow \begin{cases} D \rightarrow D_{\text{max}}; \\ T \geq T_{\text{треб}}, \end{cases} \quad (9)$$

где $F_{\text{м/д}}(X)$ – оператор модели синтезированной с целью решения задачи диагностирования неисправности.

В последнем случае, как видно из выражения (9), в качестве ограничения будет выступать оперативность. Необходимо также отметить, что оператор $F_{\text{д}}^*(X)$ характеризует более полную модель БА КА, построенной по минимуму функции невязки (1) или (2), размерность которой выше, чем модель, характеризуемая оператором $F_{\text{к}}^*(X)$. Данное утверждение связано с тем, что модель, используемая для контроля технического состояния, содержит сведения исключительно об исправном объекте контроля (ОК) $Q_{\text{и}}$, тогда как модель диагностирования содержит сведения о работоспособных $Q_{\text{раб}}$ и неисправных состояниях $Q_{\text{н}}$ ОК. На рис. 2 приведена обобщенная схема полимодельного подхода в решении задачи технического диагностирования на основе математического аппарата конечных автоматов. Данная схема составлена без учета прогноза технического состояния, как третьей задачи технического диагностированию. Как видно из схемы полимодельный подход позволяет применять также и различные способы решения поставленных задач.

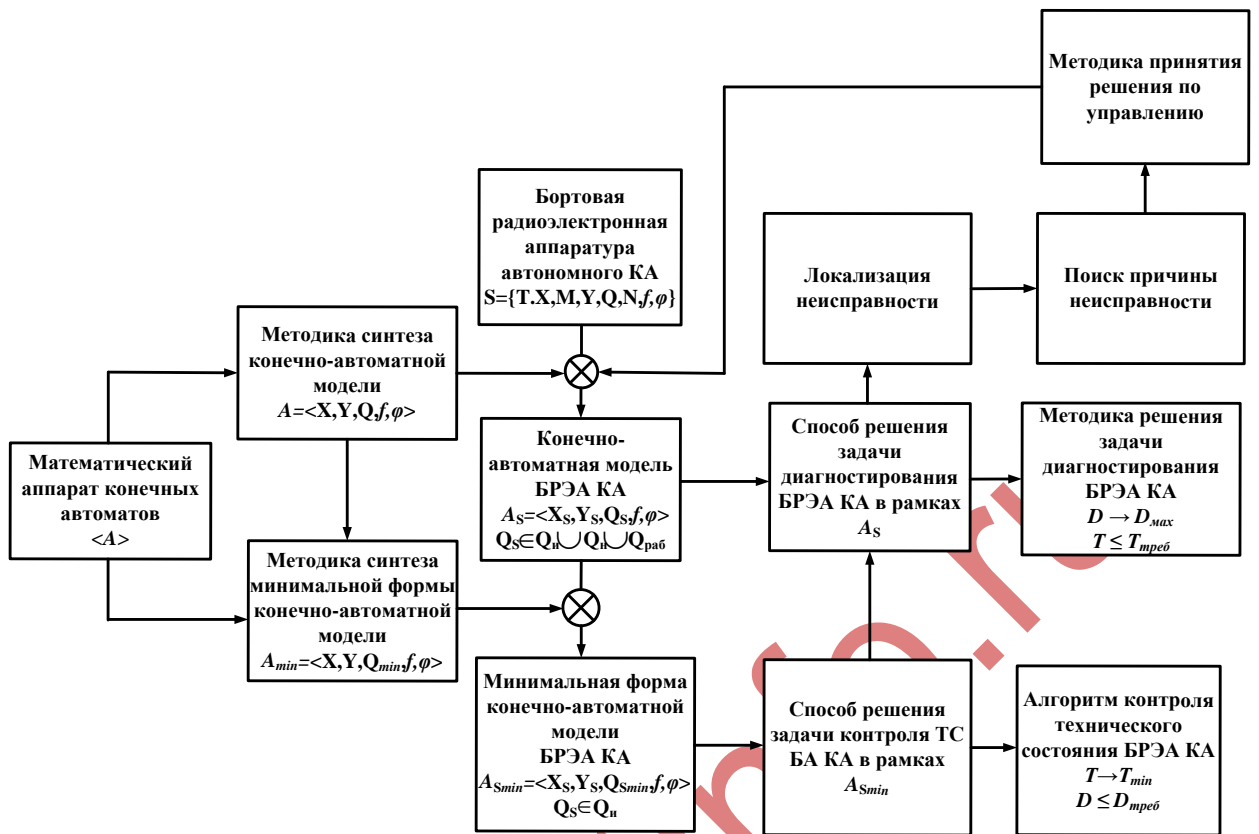


Рис. 2 Обобщенная схема полимодельного подхода в решении задачи технического диагностирования в рамках математического инструмента конечных автоматов

Так, например, решение задачи диагностирования может быть реализовано при помощи синтеза оптимальных программ диагностирования, основанных на принципах динамического программирования. Данный подход с применением агрегированных моделей подробно рассмотрен в литературе [2,7]. В свою очередь возможность применения КАМ к данному подходу, обуславливается принадлежностью агрегированных и конечно-автоматных моделей к одному и тому же классу детерминированных моделей [4]. Решение задачи контроля может быть реализовано синтезом сокращенных или полных программ испытаний, как решение задачи коммивояжера и «китайского почтальона» соответственно.

На рис. 4 приведен пример блок-схемы обобщенного алгоритма технического диагностирования, где для решения задачи контроля используются рабочий и тестовый метод.

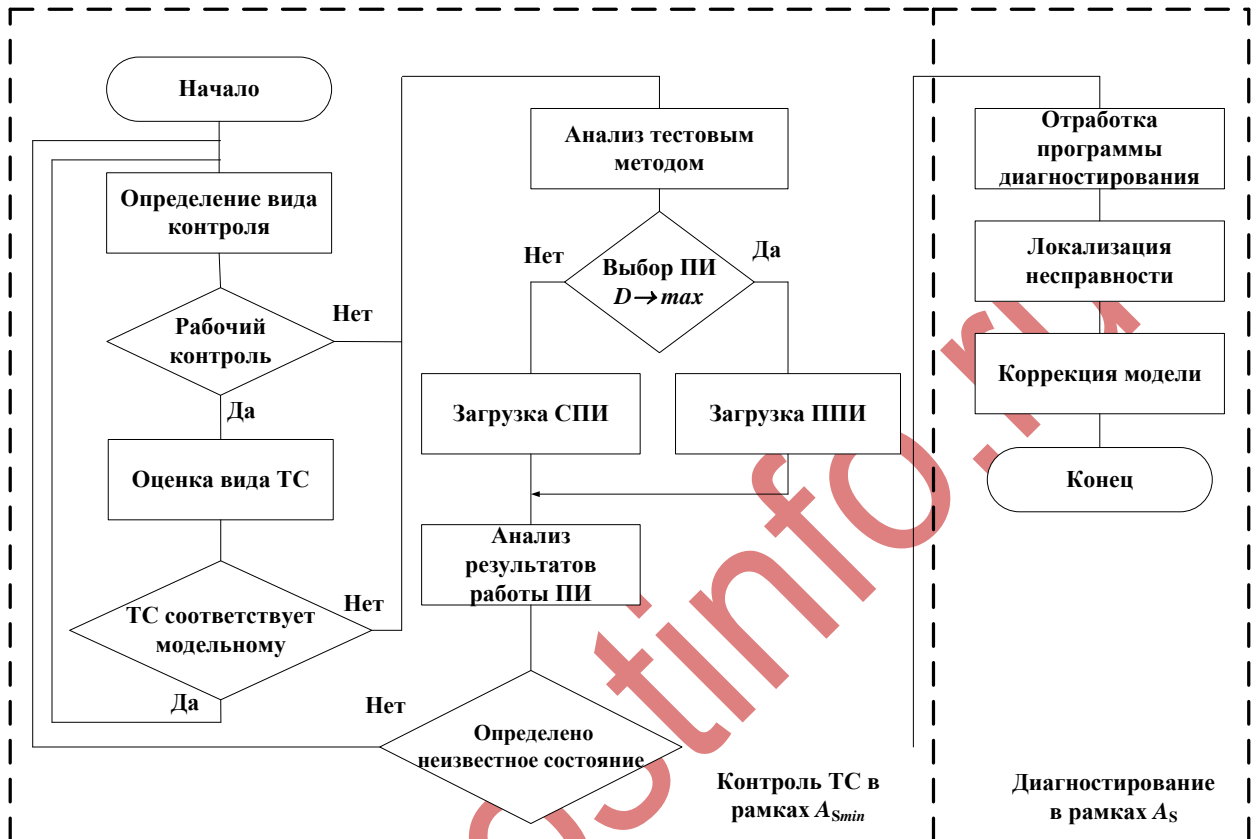


Рис. 4 Обобщенный алгоритм технического диагностирования БРЭА КА

Необходимо отметить, что для решения задачи контроля тестовым методом используются последовательности полных и сокращенных программ испытаний (ППИ и СПИ) полученных на основе математических моделей меньшей размерности A_{Smin} . В свою очередь задача диагностирования решается на основе исходной математической модели A_S с максимальной полнотой контроля за счет применения оптимальных в плане выбранных показателей программ диагностирования.

Исходными данными для работы данного алгоритма, прежде всего, являются параметры математической модели бортовой системы КА, на основе которой происходит формализация процессов функционирования БРЭА КА и ее преобразование по отношению подобия под задачу контроля.

При необходимости, а также при наличии циклограммы работы БРЭА КА возможна организация функционального (рабочего) контроля на основе синтезированной минимальной формы конечно-автоматной модели.

Выводы

Создание автоматических бортовых систем диагностирования не возможно без построения математических моделей, формализующих процесс функционирования бортовой аппаратуры космических аппаратов. Применительно к бортовой радиоэлектронной аппаратуре процесс функционирования удобно представлять в виде математических аппаратов описывающих стационарные дискретные динамические системы. Выбор конкретного инструмента зависит от целей и ограничений на применение полученных математических моделей. Однако при применении адекватных математических моделей могут возникнуть трудности при решении определенных задач на основе данных моделей в виду их большой размерности, так называемое «проклятие размерности».

Представленный в работе подход может быть использован при разработке специального программно-математического обеспечения автоматических бортовых систем диагностирования с целью эффективного решения задач контроля и диагностирования в условиях автономного функционирования.

Список использованных источников и литературы

1. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. - IV, 12 с.: ил.; 29 см.
2. Дмитриев, А.К., Идентификация и техническая диагностика. / А.К. Дмитриев, Р.М. Юсупов – МО СССР, 1987. – 525 с.

3. Дунаев, В.В. Занимательная математика. Множества и отношения. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 336 с.
4. Лоскутов, А.И. Синтез оптимальной программы диагностирования бортовых радиоэлектронных систем космических аппаратов по минимальной форме конечно-автоматной модели как решение обратной задачи определения исходных диагностических признаков. /А.И. Лоскутов, В.А. Клыков, О.Л. Шестопалова // Аэрокосмическое приборостроение 2016, – №12. – С.36-45.
5. Лоскутов А.И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем / Лоскутов А.И., Козырев Г.И. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 158 с.
6. Лоскутов А.И. Идентификация и техническое диагностирование бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе биективного преобразования множества диагностических признаков. /А.И. Лоскутов, В.А. Клыков // Контроль. Диагностика. 2016, – №4. – С.57-63.
7. Мышко, В.В. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем. / В.В. Мышко, А.Н. Кравцов, Е.В. Копкин, А.В. Чикуров – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 303 с.
8. National Aeronautics and Space Administration. NASA Technology Roadmaps TA 4:Robotics and Autonomous Systems. Draft, 2015. pp. 50-58.
9. Innovative fault detection, isolation and recovery strategies on-board spacecraft: state of the art and research challenges. A. Wander, R. Förstner. Deutscher Raumfahrtkongress, 2012. pp. 9.

© Лоскутов А.И.
© Клыков В.А.
© Столяров А.В.