

УДК 629.7  
ББК 39.62

## **Построение системы управления ориентацией космического аппарата повышенной отказоустойчивости**

**А. И. Заведеев**

### **Аннотация**

Рассмотрены процедуры синтеза, методики и алгоритмы отказоустойчивого управления космическими аппаратами на основе принципов аналитической избыточности, функционального резервирования и реконфигурации.

**Ключевые слова:** космический аппарат; система управления; отказоустойчивость; избыточность; резервирование; реконфигурация.

### **Диагностика состояния и способы поддержания работоспособности системы управления при отказах (принцип реконфигурации)**

Системы управления сложными техническими объектами подвержены воздействию таких факторов, как вариации условий функционирования, отказы составляющих элементов и устройств, которые приводят к снижению основных динамических характеристик, а в некоторых случаях и к полной потере работоспособности системы. При разработке надежной отказоустойчивой системы управления или поддержании характеристик на допустимом уровне для таких объектов крайне важно, чтобы возникшие изменения немедленно определялись и диагностировались для проведения корректирующих действий с целью реконфигурации системы и её адаптации к этим изменениям [1]. Контроль, осуществляемый для определения повреждений, называют диагностикой неисправности системы. Система контроля должна решать две основные задачи: обнаружение повреждения и его исключение. Определение неисправности сводится к принятию альтернативного решения: либо всё исправно, либо где-то в системе произошел сбой.

В задаче изоляции неисправности необходимо определить источник неисправности, например, какой датчик, рулевой привод или орган управления получил повреждение. Для реконфигурации системы относительно неисправностей в задаче диагностики необходима их идентификация.

Процедура диагностики может осуществляться с использованием информации о контролируемой системе, т. е. на основе математической модели системы. Такой подход известен как принцип аналитического резервирования, или количественный контроль и требует поиска более совершенных методов диагностики.

В последние годы внимание исследователей привлекают грубые методы контроля, которые позволяют определять зарождающиеся (слабые или малые) неисправности в системе прежде, чем они перерастут в проблемы, требующие вмешательства человека-оператора или автоматической системы (адаптации или реконфигурации).

В рамках методов, основанных на применении математических моделей, можно выделить три группы методов:

- *пространства параметров* (параметрическое оценивание и идентификация);
- *пространства сигналов* (анализ характеристик входных и выходных сигналов, предельный контроль);
- *пространства совпадений* или *соответствий* (генерирование разностей или векторов соответствия).

Методы второй группы характеризуются простотой реализации, однако предельный контроль существенно зависит от действующих условий и входных сигналов. Методы пространства соответствий (паритетов) позволяют преодолеть этот недостаток. Идея здесь заключается в генерировании вспомогательных сигналов (разностей или векторов соответствия), которые не зависят от действующих условий и входных сигналов. Разности указывают на повреждения и инициируются в идеальном случае только ими, следовательно, для определения повреждений можно использовать фиксированный порог.

Элементы пространства соответствий представляют собой разности, образованные согласно принятому уравнению. Задача диагностики заключается в формировании пространства (вектора) соответствий и анализе его элементов.

Процесс обнаружения неисправности и её изоляции включает следующие три стадии:

- формирование разностей, когда входные и выходные сигналы системы преобразуются по заданному алгоритму так, чтобы отличаться от нуля при возникновении неисправностей;
- принятие решения на основе анализа разностных сигналов с помощью решающих функций и решающих правил для установления характера повреждения. Возможен простой контроль порогового значения текущей переменной, изменения среднего значения разностей или применение методов теории статистических решений, например, с помощью вероятности последовательных испытаний;
- исключение неисправности по совокупности разностей.

Разностные сигналы формируются на основе динамических соотношений по сигналам с выхода датчиков и входа силовых приводов. В настоящей работе описываются особенности процедуры ОПИ с помощью пространства соответствий.

### Формирование разностей с помощью передаточных функций

Рассмотрим следующую модель контролируемой системы:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{R}_1\mathbf{f}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{R}_2\mathbf{f}(k),$$

где  $\mathbf{x}(k) \in R^n$  – вектор состояния,  $\mathbf{y}(k) \in R^m$  – выходной вектор,

$\mathbf{u}(k) \in R^r$  – входной вектор (управление);  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$  – известные матрицы соответствующих размерностей;  $\mathbf{f}(k) \in R^q$  – вектор повреждений с элементами  $f_i(k)$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ ), представляющими отдельные неисправности системы. Характеристики неисправностей будем считать неизвестными функциями времени. Система «вход–выход» описывается выражением:

$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z) \mathbf{u}(z) + \mathbf{G}_f(z) \mathbf{f}(z),$$

$$\text{где} \quad \mathbf{G}_u(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}, \quad \mathbf{G}_f(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2.$$

Важную роль в данном процессе играет способ формирования разностей. При возникновении неисправностей одна или более разностей должны принять значительную величину, следовательно, принцип заключается в сравнении результатов измерений с априорной информацией через разности и их анализ.

В общем случае формирователь разностей можно описать выражением:

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_u(z) \mathbf{u}(z) + \mathbf{H}_y(z) \mathbf{y}(z),$$

где  $\mathbf{H}_u(z)$ ,  $\mathbf{H}_y(z)$  – матрицы передаточных функций, реализуемые в линейных устойчивых системах. Разность должна равняться нулю при отсутствии неисправности и в случае неопределенности

$$\mathbf{r}(z) = 0, \quad \mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z) \mathbf{u}(z).$$

Синтез заключается в выборе передаточных матриц  $\mathbf{H}_u(z)$ ,  $\mathbf{H}_y(z)$ , удовлетворяющих условию  $\mathbf{H}_u(z) = -\mathbf{H}_y(z) \mathbf{G}_u(z)$ .

При возникновении неисправности вектор разностей принимает вид:

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z) \mathbf{G}_f(z) \mathbf{f}(z).$$

При повреждении  $i$ -го элемента  $i$ -й столбец передаточной матрицы  $\{\mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_f(z)\}$  должен быть ненулевым в переходном и в установившемся режимах, т. е.

$$\{\mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_f(z)\}_i \neq 0.$$

Важными моментами являются отключение неисправного элемента и устранение неисправности. Несмотря на то, что для обнаружения неисправности достаточно единственного разностного сигнала, для её исключения требуется совокупность (вектор) разностей, которая формируется одним из двух способов.

1. Структурируемая разностная совокупность: для образования совокупности разностей каждая из них должна быть чувствительна к некоторым из группы повреждений.

2. Направленные разностные векторы: разностный вектор должен быть зафиксирован в направлении заданных неисправностей в пространстве паритетов. Базисом для исключения отказа является обозначение (сигнатура) отказа, т. е. признак диагностируемой модели, определяющий влияние отказов. Каждое обозначение должно относиться только к определенной неисправности.

Проблемы исключения неисправностей датчика и силового привода сводятся к разрешению системы уравнений:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}\mathbf{1}f_{\text{СП}}(k),$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_d(k)$$

или 
$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z) + \mathbf{G}_{\text{СП}}(z)f_{\text{СП}}(z) + \mathbf{f}_d(z),$$

где  $\mathbf{f}_d(z)$ ,  $\mathbf{f}_{\text{СП}}(z)$  – векторы неисправностей в датчике и силовом приводе соответственно.

При неисправностях в датчике вектор разностей примет вид:  $\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\mathbf{f}_d(z)$ , где матрица  $\mathbf{H}_y(z)$  выбирается из специфических требований. Для исключения неисправности  $i$ -го датчика  $\mathbf{r}(z)$  выбирают из условия обнуления  $i$ -го столбца  $\mathbf{H}_y(z)$ . Если матрица  $\mathbf{H}_y(z)$  является диагональной, то каждая разность определяется специфической неисправностью датчика. Единственное ограничение на  $\mathbf{H}_y(z)$  заключается в требованиях физической осуществимости и устойчивости. Поскольку  $\mathbf{H}_y(z)$  выбирают произвольно, то исключение неисправности датчика можно всегда осуществить.

При неисправностях силового привода имеем  $\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z)\mathbf{G}_{\text{СП}}(z)f_{\text{СП}}(z)$ . В некоторых случаях определить  $\mathbf{H}_y(z)$  затруднительно и для исключения неисправностей силового привода можно применить методы теории фильтрации, а также принцип наблюдателя Люэнбергера или фильтра Калмана для оценки неизвестного входного сигнала.

Очевидно, надежность системы контроля должна превосходить надежность исходной системы. Основной проблемой на пути достижения прогресса и повышения надежности построения модели диагностики является грубость относительно моделируемых неопределенностей. Это понятие означает степень независимости характеристик системы контроля от ошибок моделирования и неизвестных (неизмеряемых) возмущений. Если в процессе диагностики используют точные модели и характеристики всех возмущений известны, то проблема грубости контролируемой системы представляется тривиальной. Однако на практике неопределенности при моделировании неизбежны. Повреждения и неопределенности оказывают влияние на разностные сигналы, но определить их воздействие в отдельности затруднительно. Задача разработчиков заключается в создании такой грубой системы контроля, которая гарантирует нечувствительность разностей к неопределенностям (грубость), но в то же время обеспечивает чувствительность к отказам.

Наиболее эффективным способом достижения грубости процесса диагностики является разделение возмущающих воздействий. В этом случае все неопределенности рассматривают как составляющие возмущений, действующих на динамическую модель вида:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}_1\mathbf{d}(k) + \mathbf{R}_1\mathbf{f}(k),$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}_2\mathbf{d}(k) + \mathbf{R}_2\mathbf{f}(k).$$

Уравнение “вход-выход” можно записать в виде:

$$\mathbf{y}(z) = \mathbf{G}_u(z)\mathbf{u}(z) + \mathbf{G}_d\mathbf{d}(z) + \mathbf{G}_f(z)\mathbf{f}(z),$$

$$\mathbf{G}_d(z) = \mathbf{C}(z\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2,$$

где  $\mathbf{E}_1\mathbf{d}(z)$ ,  $\mathbf{E}_2\mathbf{d}(z)$  – неопределенности, действующие в системе;  $\mathbf{d}(k)$  – неизвестные возмущения;  $\mathbf{E}_1$ ,  $\mathbf{E}_2$  – известные матрицы возмущений (представлены столбцами). Это пример структурированной неопределенности. В этом случае систему можно представить в виде:

$$\mathbf{y}(z) = \{\mathbf{G}_u(z) + \Delta\mathbf{G}_u(z)\}\mathbf{u}(z) + \{\mathbf{G}_f(z) + \Delta\mathbf{G}_f(z)\}\mathbf{f}(z),$$

а разностный сигнал записывается как

$$\mathbf{r}(z) = \mathbf{H}_y(z) \{\mathbf{G}_f(z) + \Delta\mathbf{G}_f(z)\} \mathbf{f}(z) + \mathbf{H}_y(z) \Delta\mathbf{G}_u(z) \mathbf{u}(z).$$

Для неструктурируемых неопределенностей, описываемых величинами  $\Delta\mathbf{G}_u(z)$  и  $\Delta\mathbf{G}_f(z)$ , очень трудно обеспечить грубость при формировании разностных сигналов. Один из путей решения этой задачи заключается в аппроксимации структуры неопределенности, например, выборе возмущений, отделенных от разностных сигналов.

Разработку методом формирования грубых разностных сигналов можно отнести к группе активных методов. При данном подходе влияние неопределенностей на разности снижается, а вместе с тем влияние повреждений на разности возрастает. Увеличения грубости диагностики можно достичь на стадии принятия решения (пассивный способ). Ситуация, в которой целиком выполняются условия грубости при формировании разностных сигналов, встречается крайне редко по причине параметрических неопределенностей, действия возмущений и помех. В особенности это касается неструктурируемой неопределенности. Следовательно, необходимо обеспечить достаточную грубость не только на стадии формирования разности, но также и на стадии оценивания разности (шаг к принятию решения). Цель грубого оценивания разности заключается в возможности уверенного принятия решения в случае ложной тревоги (достаточно малом уровне появления тревоги). Этой цели можно добиться несколькими способами, например, посредством обработки статистических данных, осреднением, корректированием или надлежащим выбором порога срабатывания.

Общий подход к принятию решения относительно повреждения заключается в определении нулевого порога, при котором сравниваются решающие функции. Обычно используют фиксированные пороги. Если решающий сигнал превышает порог, то регистрируется повреждение. При выборе фиксированного порога чувствительность к повреждениям будет снижаться, если порог выбран слишком большим, в то время как уровень ложной тревоги будет слишком большим, если порог выбран заниженным. Это является наиболее тонким моментом. При наличии неопределенностей в системе разностный сигнал флуктуирует с изменением входных сигналов даже в случае отсутствия повреждений. При выполнении маневров объекта эти изменения могут быть достаточно большими и не фиксируются порогом, который обеспечивает контроль при допустимом уровне ложной тревоги. Для повышения грубости в такой ситуации возможно использование порога, изменяющегося в зависимости от свойств объекта. Здесь проблема грубости связана с принятием решения в ситуации с неопределенными разностными сигналами. Успех диагностической процедуры зависит от требуемого уровня толерантности и выбора адекватной модели динамической системы.

#### **Поддержание работоспособности БСУ КА с помощью логических алгоритмов и проверки уравнений соответствия**

Основное внимание при обеспечении отказоустойчивости интегрированной системы управления (ИСУ) КА следует уделять таким элементам, подверженным сбоям и отказам, как датчики, БЦВМ, регулятор, рулевые приводы и исполнительные органы управления.

Современный уровень развития электроники обеспечивает отказоустойчивость бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) посредством резервирования, аппаратного и программного самоконтроля. Для обеспечения надежного функционирования бортовых ИСУ КА необходимо непрерывно осуществлять диагностику неисправностей или повреждений [2].

Для реконфигурации БСУ при отказах приводов и исполнительных органов используются два подхода: пассивный, основанный на теории робастного управления, и активный, который можно разделить на два направления.

1. Непрерывная адаптация БСУ без диагностирования, при которой коэффициенты настраиваются по заданным алгоритмам и желаемые динамические характеристики системы обеспечиваются при изменении параметров объекта, вызванных возмущениями и отказами.

2. Диагностирование с последующей непрерывной адаптацией или изменение коэффициентов в зависимости от характера отказа.

К недостатку пассивного подхода следует отнести тот факт, что он распространен на случай изменения параметров системы в небольших пределах. Диагностирование с адаптацией имеет преимущество перед непрерывной адаптацией в том, что при отсутствии отказов адаптация не применяется и, следовательно, не ухудшает динамику системы. Однако процедура диагностирования усложняет систему. Если число возможных отказов невелико, то можно в ряде случаев применить диагностирование с последующей перенастройкой коэффициентов, рассчитанных на каждый тип отказа. В противном случае требуется идентификация параметров после отказа, при которой по известным алгоритмам рассчитывают коэффициенты регулятора.

Использование в БСУ КА функционально избыточных измерительных блоков позволяет существенно повысить точность измерений и надежность обеспечения информацией бортовых систем.

Существуют различные алгоритмы обнаружения и идентификации отказов измерителей. Условно их можно разделить на две группы: одни строятся на вычислении наилучшей оценки измеряемой величины, т. е. требуют совместной реализации алгоритма обработки избыточной информации и алгоритма обнаружения отказов, другие предполагают автономную реализацию этих алгоритмов. Алгоритмы первой группы достаточно просто реализуются, однако требуют значительных затрат времени БЦВМ [3]. Для реализации алгоритмов второй группы вводится система уравнений *проверки на соответствие*.

Проиллюстрируем данную процедуру на примере построения инерциальной системы управления ориентацией. Как известно, с любых трёх неколлинеарных и некомпланарных

одноосных измерителей может быть получена информация об измеряемой векторной величине. Информация со всех дополнительных измерителей является избыточной. Это позволяет в функционально избыточном блоке объединить любые четыре измерителя таким образом, что их линейная комбинация будет равна нулю при условии, что все измерения идентичны. Исходя из этого условия, формируются проверочные уравнения. Уравнения соответствия объединяются в систему. Каждое из них представляет собой линейную комбинацию измерений, произведенных четырьмя способами. Общее число таких уравнений для блока, включающего  $n$  измерителей, определяется как  $C_n^4$  – число сочетаний из  $n$  по четыре элемента. Например, для функционально избыточного блока из шести однокомпонентных измерителей можно составить  $C_6^4 = 15$  проверочных уравнений. Информация с каждого измерителя входит в  $C_5^3 = 10$  проверочных уравнений, поэтому при отказе одного из измерителей 10 уравнений из 15 удовлетворяться не будут. При отказе второго измерителя не будут удовлетворяться все уравнения, кроме одного. Этот принцип положен в основу алгоритма определения отказов.

Все уравнения соответствия составлены в предположении, что измерители не имеют погрешностей. С учётом погрешностей в правой части этих уравнений будет присутствовать не нуль, а некоторая малая величина, называемая невязкой и зависящая только от погрешностей измерителей. Выберем допустимое пороговое значение невязки, которое зависит от режима движения основания объекта. Поскольку получить его аналитически обычно не представляется возможным, то в каждом отдельном случае диапазон пороговых значений выбирается исходя из требуемой точности решения навигационной задачи, а конкретная величина порога находится с помощью моделирования. Сравнение невязки с пороговым значением позволяет судить о наличии или отсутствии в составе функционально избыточного измерительного блока неисправных элементов. В результате до начала обработки информации с помощью данного алгоритма осуществляется контроль над исправным функционированием блока.

Если алгоритм обнаруживает сбой, то возникает задача идентификации неисправного элемента, которая решается с помощью той же группы уравнений. Алгоритм идентификации строится по следующей логической схеме. Каждому уравнению контроля поставим в соответствие число  $K$ . Пусть  $K$  равно нулю, когда уравнение удовлетворяется, и равно единице в противном случае. Например, положим, что вышел из строя первый измеритель, тогда все  $K$ , кроме последних пяти, будут равны единице. Если выйдет из строя второй измеритель, то четырнадцать чисел  $K$  будут равны единице и только последнее останется



нулевым. Перебрав последовательно все измерители, можно составить контрольную таблицу идентификации неисправного элемента.

Для определения типа сбоя используют специальный алгоритм (перекалибровки), который для избыточной системы не является обязательным, однако, если ресурс БЦВМ позволяет его реализовать, надежность системы возрастает. После того как отказавший измеритель идентифицирован, необходимо предотвратить поступление его информации на обработку. Алгоритм предназначен для определения типа сбоя и, если сбой устранимый, возвращения в строй неисправного измерителя. Устранимый сбой может быть вызван смещением нуля, превышающим пороговое значение, изменением масштабного коэффициента и другими причинами. В подобных случаях прибор может быть откалиброван заново. Для этого информация, поступающая с неисправного прибора, сравнивается с результатами точных измерений, осуществляемых блоком. Коррекция выполняется за счет изменения постоянных коэффициентов, заложенных в программу. Затем производится реструктурирование системы, и измеритель снова включается в работу.

Рассмотрим алгоритм, включающий обнаружение ошибки, идентификацию отказавшего элемента и перекалибровку системы на примере функционально избыточного блока ориентации бесплатформенной инерциальной системы, выполненного на базе трех свободных гироскопов. В алгоритме обнаружения отказов в качестве первичной используют информацию об относительном расположении векторов кинетических моментов (КМ) гироскопов. Уравнения контроля составляют путем сравнения косинусов углов между соответствующими парами векторов КМ с их значениями после начальной выставки и занесенными в память БЦВМ согласно условиям:

$$|a_1 - a_1^0| \leq \delta_1, \quad |a_2 - a_2^0| \leq \delta_2, \quad |a_3 - a_3^0| \leq \delta_3,$$

$$a_1 = \alpha_{11}\alpha_{21} + \alpha_{12}\alpha_{22} + \alpha_{13}\alpha_{23},$$

$$a_2 = \alpha_{11}\alpha_{31} + \alpha_{12}\alpha_{32} + \alpha_{13}\alpha_{33},$$

$$a_3 = \alpha_{21}\alpha_{31} + \alpha_{22}\alpha_{32} + \alpha_{23}\alpha_{33},$$

где  $a_k$  – текущее значение косинуса угла между векторами КМ гироскопов, используемых в  $k$ -м варианте;  $a_k^0$  – начальное значение косинуса угла;  $\delta_k$  ( $k=1,2,3$ ) – допуск на уход соответствующей пары гироскопов;  $\alpha_{ij}$  – направляющие косинусы между  $i$ -м вектором КМ и  $j$ -й осью базовой системы координат измерительного блока. Пороговое значение невязки  $\delta_k$  выбирают исходя из требований точности решения задачи.

Неисправным считается гироскоп, уход которого превысил соответствующий допуск. Невыполнение хотя бы одного из неравенств свидетельствует об отказе. Алгоритм идентификации строится на анализе тех же уравнений. Отказавший гироскоп определяется согласно таблице с указанием подпрограмм изменения алгоритма обработки избыточной информации.

Идентификация отказов

| Отказавший прибор | Номер проверочного условия |       |       | Алгоритм      | Контроль  |
|-------------------|----------------------------|-------|-------|---------------|---|
|                   | $K_1$                      | $K_2$ | $K_3$ |               |   |
| Нет               | 0                          | 0     | 0     | $A_0$         | Фиксируется сбой и идентифицируется отказавший прибор. Общий сбой |
| $H_1$             | 1                          | 1     | 0     | $A_3$         |   |
| $H_2$             | 1                          | 0     | 1     | $A_2$         |   |
| $H_3$             | 0                          | 1     | 1     | $A_1$         |   |
| Два или все       | 1                          | 1     | 1     | Сигнал отказа |   |

В таблице каждому проверочному условию соответствует число  $K$ , принимающее значение нуль при выполнении неравенства, и единица – в противном случае.

После исключения информации от прибора, идентифицированного как отказавший, надежность системы снижается. Если неравенства позволяют фиксировать некатастрофический отказ, то можно произвести перекалибровку прибора. Например, в качестве допустимого можно принять уход, в два раза превышающий номинальное значение. В результате как некатастрофический квалифицируется отказ, при котором выполняется условие  $|\Delta a_k| \leq 2\delta_k$ . Затем с целью повышения надежности система реконфигурируется и обработка информации производится по исходному алгоритму  $A_0$ , т. е. все приборы считаются исправными. Реализация алгоритмов не требует больших затрат ресурса БЦВМ.

### Заключение

Важным моментом диагностики повреждений является простота алгоритма формирования разностного сигнала для определения повреждения и его изоляции. Несмотря на общую постановку задачи исследования в расширенном пространстве состояний, рассмотренные алгоритмы касались только случая «вход-выход» и измерения всех действующих сигналов.

Проведенный анализ главных причин снижения надежности БСУ современных КА показал, что таковыми являются отказы информационно-измерительных приборов, силовых приводов и органов управления.

Изучение описанных в литературе способов «активной» реконфигурации дает основание разделить их на два направления, образованных по принципу организации процедур диагностирования и адаптации.

Рассмотрены различные подходы к проблеме диагностики отказов с помощью пространства соответствий, не требующие вычисления наилучшей оценки измеряемой величины и обладающие свойством грубости относительно неопределенностей.

Предложены адаптивные алгоритмы контроля и диагностики БСУ КА, реализующие гибкую логику работы системы в условиях космического полета.

#### **Список литературы**

1. Земляков С. Д., Рутковский В. Ю., Силаев А. В. Реконфигурация систем управления летательными аппаратами при отказах. Автоматика и телемеханика. 1996, № 1. С. 3–20.
2. Гришин Ю. П., Казаринов Ю. М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М.: Радио и связь. 1985. – 176 с.
3. Глинский В. А., Заведеев А. И., Моисеенко В. Е. Разработка методов проектирования отказоустойчивых систем управления и навигации аэрокосмических летательных аппаратов на базе принципов функционального резервирования и реконфигурации. Авиакосмическое приборостроение. 2002, № 4. С. 35–38.

#### **Сведения об авторе**

Заведеев Аркадий Иванович , доцент Московского авиационного института, к.т.н.,  
тел.:(495) 949-93-70; E-mail: [verazavedeeva@qwertyru.ru](mailto:verazavedeeva@qwertyru.ru)

