УДК 681.5.015:629.7.05

Кулик А. С.[1], Лученко О. А.[2], Фирсов С. Н.[3]

[1]Д-р техн. наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

[2] Генеральний директор-Головний конструктор Хартрон-Плант

[3]Канд. техн. наук, доцент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

Представлено унифицированное описание процессов в типовых блоках и в спутниковой системе как процесса развития нештатных ситуаций, так и процесса их парирования. Кроме того, предложена четырехуровневая схема параметризации прямых признаков отказов. Изложены модели и средства восстановления работоспособности спутниковых систем.

Ключевые слова: спутниковая система ориентации и стабилизации, избыточность, датчики.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное и качественное выполнение полетных заданий малыми космическими аппаратами во многом определяется способностью бортовых управляющих систем, к числу которых относится спутниковые системы ориентации и стабилизации, выполнять целевые функции, как в штатных условиях, так и при возникновении нештатных ситуаций [1].

Нештатная ситуация – это такое состояние функционирования спутниковой системы ориентации и стабилизации (ССОС), когда появляется нерасчетное отклонение характеристик от номинального режима, обусловленного техническим заданием. Причину, приводящую к появлению нештатных ситуаций, называют уже устоявшимся в специальной литературе последних лет обобщенным термином – отказ.

Современные и перспективные требования к локализации нештатных ситуаций ССОС обуславливают поиск новых более эффективных и конструктивных подходов, базирующихся на рациональном парировании посредством минимальных избыточных аппаратных средств и с помощью значительных программных средств восстановления работоспособности отказавших компонент, приборов и гибкого их использования [2]. Многообещающим представляется подход, базирующийся на принципе парирования нештатных ситуаций посредством гибкого управления значительными унифицированными и универсальными избыточными ресурсами восстановления отказавших компонент и всей системы в целом [3]. Это определяет необходимость применения принципиально нового класса ССОС, обладающих способностью в реальном масштабе времени при возникновении нештатных ситуаций «снять» неопределенность по моменту возникновения отказа, его месту появления, классу отказа и конкретного его вида, а затем принять решение, исходя из имеющихся ресурсных возможностей, по парированию последствий с целью восстановления работоспособности до приемлемых запасов устойчивости и показателей качества, т. е. свойством самоорганизации посредством обеспечения отказоустойчивости [4].

Основой отказоустойчивых ССОС является развитое алгоритмическое обеспечение разрабатываемое на основе совокупности моделей, отражающих информационные аспекты преобразовательных свойств компонент и связей этих систем. Ключевыми математическими моделями, позволяющими формировать процесс разработки, являются диагностические модели, отражающие связь между причиной отказа и ее последствиями. Использование соответствующих диагностических моделей и методов решения последовательности диагностических задач позволяют разработать алгоритмическое обеспечение. Результаты диагностирования позволяют формировать и решать задачи по восстановлению работоспособности аварийного динамического объекта, с помощью соответствующих диагностических моделей и методов.

1. ССОС, КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ

С целью формирования основных положений разработки алгоритмического обеспечения отказоустойчивой ССОС, рассмотрим ее обобщенную блок-схему (рис. 1).

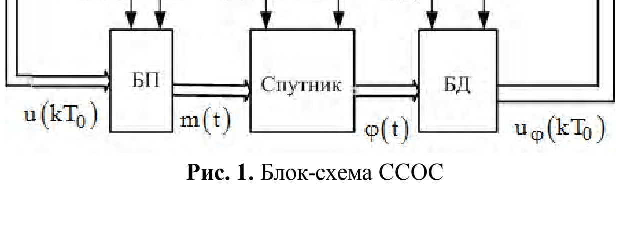

Рис. 1. Блок-схема ССОС

© Кулик А. С., Лученко О. А., Фирсов С. Н., 2012

В этой схеме отражены четыре основных функциональных подсистемы, с помощью которых реализуется принцип управления по отклонению для осуществления ориентации и стабилизации спутника.

На функциональную подсистему-спутник действуют управляющие моменты $m(t)$, возмущающие воздействия $f_3(t)$ и виды отказов D_3. Положение спутника в пространстве характеризуется вектором состояния $\varphi(t)$. Подсистема – блок датчиков (БД) преобразует вектор состояния $\varphi(t)$ в соответствующие дискретные значения вектора измерений $u_{\varphi}(kT_0)$. На БД действуют внешние возмущения $f_4(t)$ и внутренние D_4. Измерения $u_{\varphi}(kT_0)$ поступают в следующую подсистему – блок вычислителей (БВ), формирующий вектор сигналов управления $u(kT_0)$. БВ подвержен действию, как внешних возмущений $f_1(t)$, так и внутренних D_1. Управляющие воздействия в подсистеме блок приводов (БП) преобразуются в вектор управляющих моментов , компенсирующих влияние возмущающих воздействий и управляющих положением спутника в пространстве. Возмущающие воздействия и изменяют функциональные свойства БП.

Как известно, движение спутника относительно центра масс описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений Эйлера в проекциях на оси связанной системы координат [1]. При инженерных исследованиях производят упрощение исходных нелинейных дифференциальных уравнений до линейных.

Для измерения углового положения спутника и угловых скоростей в БД используются астродатчики, гироскопические измерители вектора угловой скорости, инфракрасные измерительные устройства, магнетометры [1, 5]. Преобразовательные особенности типовых БД, используемых на спутниках, могут быть описаны уравнениями первого приближения в форме линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, а также в форме передаточных функций.

Управляющие моменты на спутник формируются с помощью различных активных способов: использования реактивных сил, вращения инерционных масс, размещенных внутри спутника, при помощи гироскопов, использование магнитного поля Земли. Эти способы реализуются в БП с помощью соответствующих приводов: газореактивных и плазменных двигателей, двигателей маховиков, силовых гироскопов и др. [1]. Для инженерных расчетов систем ориентации и стабилизации на практике используются математические модели в форме передаточных функций.

В подсистеме БВ реализуются алгоритмы ориентации и стабилизации спутника. Как правило, это линейные законы управления.

Следовательно, в общем виде можно рассматривать математическую модель любого блока и всей системы в целом как модель динамического объекта в линейном приближении.

С целью обеспечения требуемого периода активного существования ССОС оснащаются избыточным приборным оборудованием и устройствами подстройки, коррекции сигналов и параметров. Для описания таких избыточных структур подсистем использование аппаратов дифференциальных уравнений и передаточных функций приводит к громоздким, трудно обозримым и сложно преобразуемым математическим выражениям. Более того, такие математические средства описывают только управляемые и наблюдаемые состояния объектов исследования. Отказы в подсистемах и системе приводят к появлению в объектах исследования как неуправляемых, так и ненаблюдаемых состояний. Для отражения этих состояний в объектах исследования требуются другие математические средства. Наиболее совершенными математическими конструкциями для описания объектов исследования, как в номинальном, так и возмущенном отказами движении представляются векторно-матричные уравнения в пространстве состояний.

Используя известные методы перехода от непрерывных математических моделей к дискретным, можно представить преобразовательные особенности в номинальном режиме функционирования ССОС в виде обобщенного динамического объекта в форме конечно-разностных уравнений:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k);$$
$$y(k) = Cx(k) + Du(k);\; x(k_0) = x_0,$$

где $x(k)$ – n-мерный вектор состояния объекта; $x(k) \subset X^n$; $u(k)$ – n-мерный вектор управления; $u(k) \in U^r$; $y(k)$ – m-мерный вектор измерений объекта; $y(k) \in Y^m$; A, B, C и D – матрицы соответствующих размерностей.

Обобщенная функциональная схема, предлагаемая для разработки отказоустойчивого динамического объекта, к числу которых относится ССОС, с развитыми функциями глубокого диагностирования функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности представлена на рис. 2. Принцип действия представленной схемы заключается в следующем. На объект диагностирования и восстановления (ОДИВ) подаются управляющие воздействия $u(kT_0)$ с помощью имитатора управляющих воздействий (ИУВ), возмущающие воздействия $f(kT_0)$ с помощью имитатора возмущающих воздействий (ИВВ), виды отказа d_i посредством имитатора видов отказов (ИВО). Реакция ОДИВ отражается в доступном измерению выходе $\tilde{y}(kT_0)$.

Основными функциональными элементами, обеспечивающими диагностирование функционального состояния (ДФС), служат модуль обнаружения отказов (МОО), модуль поиска места (МПМ) отказа, модуль определения класса (МОК) отказа и модуль установления вида (МУВ) отказа. В результате согласованного функционирования этих модулей формируется полный диагноз

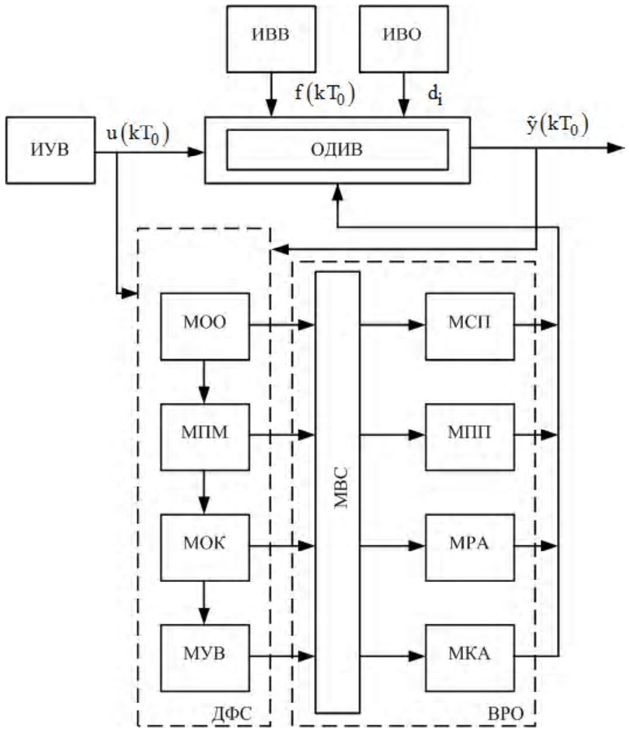

Рис. 2. Обобщенная функциональная схема отказоустойчивой ССОС

функционального состояния управляемого динамического объекта. Полный диагноз о наличии отказа, его месте в блоке, классе и конкретном виде проявления поступает на модуль выбора средств (МВС) восстановления работоспособности, с помощью которого производится выбор ресурсов восстановления. Наиболее типовые ресурсы в схеме представлены такими модулями: модуль сигнальной подстройки (МСП), модуль параметрической подстройки (МПП), модуль реконфигурации алгоритмов (МРА) и модуль коммутации аппаратуры (МКА). В совокупности эти модули обеспечивают восстановление работоспособности объекта (ВРО). Разработка представленных модулей производится на основе специфических математических моделей, отражающих влияние вида отказа на функциональные свойства объекта. Этот класс моделей назван диагностическими моделями (ДМ).

2. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРЯМЫХ ПРИЗНАКОВ ОТКАЗОВ ССОС

Отказ в ССОС рассматривается как событие неопределенное, обусловленное неопределенностью момента его появления, места возникновения, принадлежности к классу и конкретному виду отказа. Для формирования машинных диагностических моделей динамических объектов необходимо каждому прямому признаку отказа поставить в соответствие параметр. Прямые признаки это: 1) признак вида отказа; 2) признак класса отказа; 3) признак места отказа; 4) признак наличия отказа. Для конструктивной параметризации прямых признаков отказов нужно определиться с глубиной диагностирования динамических объектов. Установление глубины диагностирования представляет в теории диагностирования известную задачу, решаемую только на уровне формирования исходных данных для задачи диагностирования. При решении практических задач глубокого диагностирования функционального состояния динамических объектов и гибкого восстановления их работоспособности, другими словами, практических задач активной отказоустойчивости динамических объектов необходимость формирования множества D (множества физических видов отказов) превращается в актуальную задачу. Суть этой задачи заключается в следующем. С одной стороны, на каждом этапе жизненного цикла спутниковых систем ориентации и стабилизации устанавливается свое конечное множество причин отказов, которые структурируются в иерархическую схему. На основном этапе жизненного цикла – эксплуатации, иерархическая схема причин отказов самая большая по числу элементов и связей и поэтому самая представительная, отражающая предельно-возможную глубину причинно-следственных связей возможных нештатных ситуаций спутниковых систем ориентации и стабилизации.

Рассмотрим примеры анализа причин возможных отказов в гироскопическом датчике угла СГ–3–2Р. На рис. 3 представлено дерево возможных причинно-следственных связей отказа, связанного с дрейфом нуля датчика.

Для конкретного этапа жизненного цикла ССОС и реальных условий количество уровней древовидной схемы будет изменяться. Поэтому представленные схемы событий и связей, раскрывающих причинно-следственную обусловленность нештатных ситуаций – это всего лишь эскиз, показывающий возможность структуризации задачи диагностирования на качественном эвристическом уровне, а также сложность, невозможность полной формализации задачи формирования множества D на каждом этапе жизненного цикла ССОС.

С другой стороны, парирование нештатных ситуаций на каждом этапе жизненного цикла осуществляется с помощью соответствующих избыточных ресурсов, причем, чем больше избыточных ресурсов, тем выше качество парирования нештатных ситуаций. На практике множество избыточных ресурсов R ограничено и, более того, один из ведущих принципов главного конструктора миссии – это минимизация расходов и, в частности, избыточных ресурсов. Очевидное противоречие между глубиной диагностирования, косвенной характеристикой которой служит мощность множества D, и гибкостью восстановления, количественная оценка этого свойства, косвенная, содержится в мощности множества R, может быть разрешено посредством нахождения компромисса. Формализовать задачу нахождения наилучшего соответствия между множествами D и R пока не удается по целому ряду причин. Первая – уникальность космических миссий порождает оригинальность технических решений, для которых построение иерархий причинно-следственных связей, раскрывающих причины возможных нештатных ситуаций превращается в многоразмерную и неразрешимую задачу. Вторая – процедуры диагностирования и восстановления по сути своей

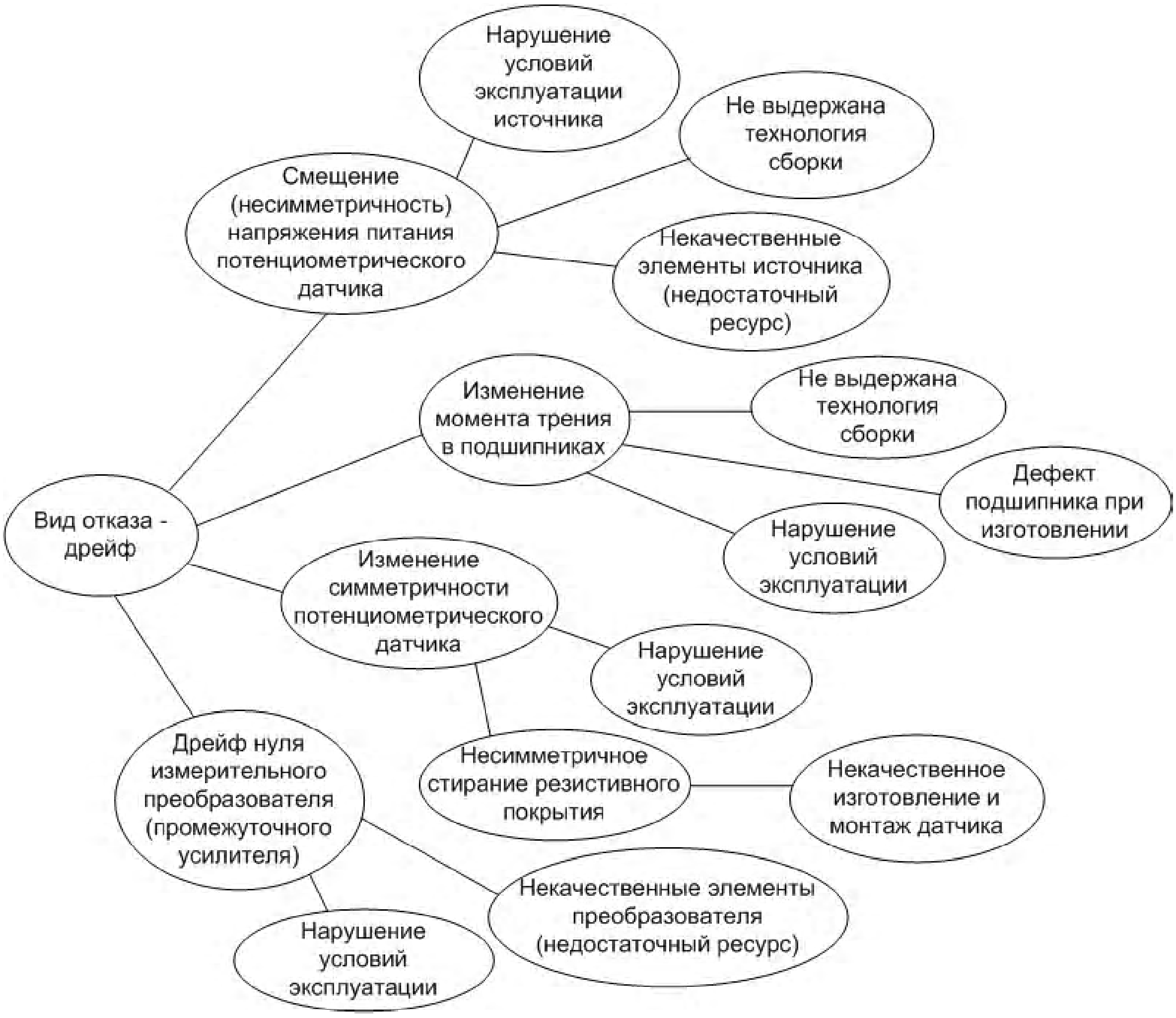

Рис. 3. Дерево возможных причин отказов для класса дрейфов нуля в СГ–3–2Р

изменяющиеся и зависящие от текущей нештатной ситуации, т. е. динамические. Поэтому пока не удается среди известных методов выбора найти метод, базирующийся на принципе динамичности выбора ресурсов. Третья причина обусловлена особенностями реализации процедур диагностирования и восстановления на бортовых вычислительных средствах в условиях жестких ограничений по быстродействию.

Рассмотрим задачу формирования множества D на основании проведенных исследований. ССОС как объект диагностирования и восстановления характеризуется статическими характеристиками, отражающими преобразовательные свойства в установившихся режимах функционирования, а также переходными, отражающими преобразовательные свойства в динамических режимах функционирования. Любые отклонения от допустимых техническим заданием изменений характеристик представляют собой отказы, порождающие нештатные ситуации. Проведенная серия экспериментальных исследований, а также результаты расследования типовых нештатных ситуаций в функционировании ССОС позволили систематизировать различные отклонения в статических характеристиках в соответствующие классы отказов: $L = \bigcup_{i=1}^{4} L_i$, где L_1 – класс дрейфов; L_2 – класс изменений коэффициента передачи; L_3 – класс обрывов и L_4 – неизвестный класс. Различные отклонения в переходных характеристиках тоже систематизированы в ряд классов $P = \bigcup_{i=1}^{4} P_i$, где P_1 – увеличение инерционности; P_2 – уменьшение запаса устойчивости по амплитуде; P_3 – уменьшение устойчивости по фазе и P_4 – неизвестный класс. Итак, для динамического объекта можно провести по результатам анализа его статических и динамических свойств классификацию возможных отказов по восьми классам: четыре класса для отклонений статических характеристик и четыре класса для отклонений динамических характеристик. Итак, все множество возможных отказов в функционировании динамического объекта может быть представлено $K = L \cup P = \bigcup_{i=1}^{8} K_i$. Каждому классу после проведенной классификации ставится в соответствие параметр, характеризующий данный класс и позволяющий отличать этот класс от других, а также доступный вычислению. Самая простая процедура параметризации, когда одному классу соответствует один параметр, т. е.

$K_i \div \alpha_i$, $i = \overline{1,8}$. Например, класс дрейфов включает такие виды отказов: d_1 – дрейф положительный компенсируемый; d_2 – дрейф положительный некомпенсируемый; d_3 – дрейф отрицательный компенсируемый; d_4 – дрейф отрицательный некомпенсируемый. Все четыре вида отказов характеризуются параметром смещения статической характеристики по оси ординат $E_0 \div \alpha_1$.

Параметризация видов отказов и классов – взаимосвязанные задачи, так как класс формируется из подмножества видов, покрываемых одним параметром, а виды отказов параметризуются в номинальной шкале с помощью интервализации параметра класса, исходя из возможности последующего парирования видов отказа с помощью имеющихся избыточных средств, т. е. исходя из устранимых последствий причин отказов. Конструктивные и функциональные особенности динамического объекта, а также возможности по парированию отказов позволяют перейти к следующему уровню параметризации прямых признаков отказов, а именно к параметризации мест отказа – конструктивно-законченной части объекта, где произошел отказ, и, более того, этот отказ можно парировать на этом уровне: на уровне места. Итак, в результате систематизации классов отказов формируется множество мест отказов $M = \{m_1, m_2, ..., m_n\}$, здесь m_i – имя конструктивно законченной части динамического объекта. Параметризация мест отказов заключается в выборе из множества параметров, характеризующих качество функционирования m_i части объекта, такого одного параметра, который вычисляется по косвенным измерениям в условиях известных ресурсных ограничениях и однозначно характеризует часть объекта m_i, т. е. $m_i \div \beta_i$.

Завершающий уровень параметризации прямых признаков отказов – это формирование параметров, характеризующих факт наличия отказов в динамическом объекте. Предлагаемая параметризация прямых признаков отказов представляет, по сути, иерархическую схему параметризации, которую условно можно отобразить следующей цепочкой $D \to P^{в} \to P^{к} \to P^{м} \to P^{о}$, где $P^{в} = \left\{p_i^{в}\right\}_1^q$ – множество параметров видов отказов и $p_i^{в} \div d_i$, $d_i \in D$; $P^{к} = \left\{p_i^{к}\right\}_1^l$ – множество параметров классов отказов; $P^{м} = \left\{p_i^{м}\right\}_1^s$ – множество параметров мест отказов; $P^{о} = \left\{p_i^{о}\right\}_1^n$ – множество параметров, характеризующих появление отказов. Графически принцип иерархической параметризации можно представить схемой, изображенной на рис. 4.

Следует отметить, что множество параметров формируются в разнотипных измерительных шкалах, так множество $P^{в}$ формируется в номинальной шкале признаков, а множества $P^{к}$, $P^{м}$ и $P^{о}$ – в относительной шкале или других, в зависимости от физических параметров, используемых при построении математических моделей номинального и возмущенного движений динамических объектов.

3. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ССОС

Для математического описания аварийных, нештатных режимов используют различные ДМ, позволяющие формализовать причинно-следственные связи, формировать подходы к диагностированию функционального состояния и восстановлению работоспособности динамических объектов, оценивать возможность обнаружения отказов, поиска места их возникновения, установления класса. Использование ДМ дает возможность целенаправленно выбирать косвенные диагностические признаки и аналитически формировать алгоритмы решения основных задач диагностирования, а также обоснованно выбирать функциональный критерий отказоустойчивости и произвести синтез алгоритмов восстановления работоспособности. ДМ отражают с помощью различных формальных средств причинно-следственных связей развития нештатных ситуаций. Различают вербальные, графические, математические и машинные ДМ. Построение ДМ является трудоемким итерационным процессом, связанным с многочисленными экспериментально-теоретическими исследованиями и отработками. Методики построения ДМ базируются на методиках пост-

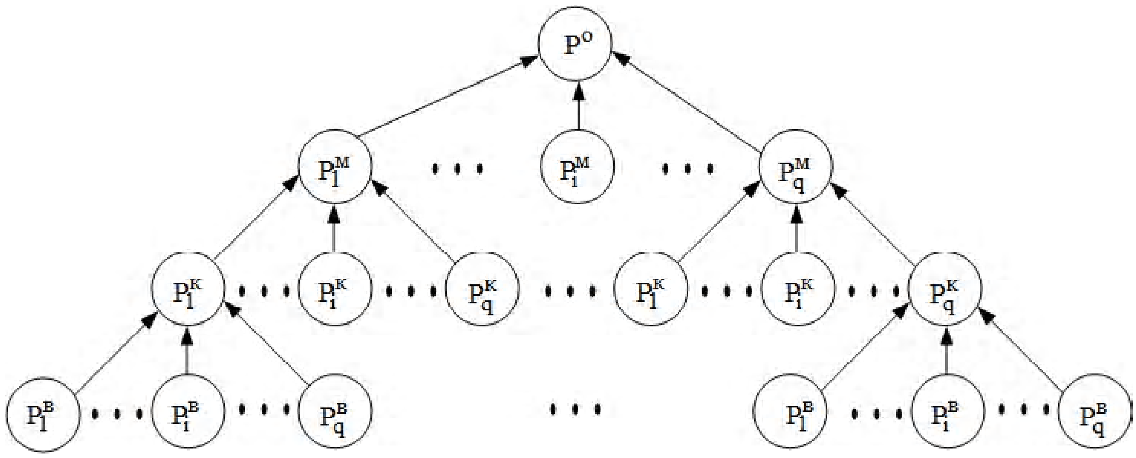

Рис. 4. Иерархическая схема параметризации прямых признаков отказов

роения традиционных управленческих вербальных, графических, математических и машинных моделей функциональных элементов и систем управления. Рассмотрим принципы построения иерархической совокупности квинтэссенции моделирования-машинных диагностических моделей (МДМ). При разработке диагностического обеспечения любого динамического объекта приходится решать следующие основные задачи: 1) обнаружение отказов; 2) поиск места отказа; 3) определение класса. Каждая из этих задач обладает специфичностью, как в постановке, так и в используемых методах решения. В связи с этим при решении каждой задачи используют свой тип МДМ. Причем, эти МДМ связаны между собой в иерархическую структуру, в которой на верхнем уровне находятся МДМ для обнаружения отказов, на среднем уровне располагаются МДМ для поиска места отказа, а на третьем уровне – МДМ для решения задачи определения класса отказа.

Построение иерархии МДМ начинается с моделей третьего уровня. Для этого в соответствии с методологией обеспечения отказоустойчивости изучают в соответствии с первым этапом, объект исследования – динамический объект, затем на втором этапе формируют множество потенциально возможных физических видов отказов. Это множество видов отказов устанавливают в результате исследовательской деятельности, связанной с анализом надежностных характеристик объекта, опыта эксплуатации подобных объектов, возможных ресурсов для восстановления работоспособности и других характеристик. Здесь же выявляют и возможные типы отказов по таким признакам, как степень влияния на работоспособность объекта, характер проявления, связь с другими отказами, частота проявления, характер возникновения. В конечном итоге формируют множество физических видов отказов, по отношению к которым система должна быть отказоустойчивой.

С целью конкретизации изложения особенностей построения иерархии МДМ введем такое обозначение этого множества: $D = \{d_1, d_2, \ldots, d_q\}$, где d_i – i-й физический вид отказа, например, для блокового уровня – «залипание» измерителя угловой скорости на нуле, дрейф нуля до 0,1°; поломка внешних элементов конструкции спутника; уменьшение управляющих моментов двигателей маховиков на 10 % и ряд других.

Рассмотрим особенности формирования уравнений МДМ для задачи определения класса отказов. Классы возможных видов отказов формируются в результате параметризации элементов множества D. Параметризация означает, что элементу или группе элементов ставится в соответствие параметр, характеризующий соответствующий физический вид отказа, или несколько видов, описанных вербально. Итак, на практике для большинства динамических объектов $\exists d_i,\ d_i \in D$ можно выбрать параметр, характеризующий целый класс видов отказов. Например, для акселерометров – это параметр, характеризующий дрейфы: положительные, отрицательные, компенсируемые и некомпенсируемые. Следовательно, в результате параметризации формируют множество параметров классов: $\mathscr{A} = \{\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_\eta\}$, $\forall \alpha_i \in [\alpha_i]$, где $[\alpha_i]$ – вещественное интервальное число; $\eta \le q$. На всех этапах проектирования ССОС для описания номинальных, штатных режимов функционирования агрегатов, приборов, блоков и всей системы в целом используют линеаризованные математические модели [1]. Подобное описание применимо и для нештатных режимов, вызванных видами отказов множества D. Представим возмущенное движение динамического объекта в канонической наблюдаемой форме с помощью следующей машинной системы уравнений:

$$\begin{aligned}&\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}_1\tilde{x}(k) + \tilde{B}_1 u(k);\\ &\tilde{y}(k) = C_1\tilde{x}(k) + \tilde{D}_1 u(k);\ \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0,\end{aligned} \tag{1}$$

где $\tilde{x}(k)$ – υ_1-мерный вектор состояния аварийного динамического объекта, $\tilde{x}(k) \in X^{\upsilon_1}$; $u(k)$ – υ_2-мерный вектор управляющих воздействий, $u(k) \in U^{\upsilon_2}$; $y(k)$ υ_3-мерный вектор измерений, $\tilde{y}(k) \in Y^{\upsilon_3}$; $\tilde{A}_1$, $\tilde{B}_1$, C_1 и $\tilde{D}_1$ – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей.

МДМ ML-модель для i-го класса отказов описывается в виде:

$$\begin{aligned}&\Delta x(k+1) = G_1\Delta x(k) + \left[A_{\alpha_i}\hat{x}(k) + B_{\alpha_i}u(k)\right]\Delta\alpha_i;\\ &\Delta y(k) = C\Delta x(k) + \left[D_{\alpha_i}u(k) + F_{\alpha_i}\right]\Delta\alpha_i;\\ &\Delta x(k_0) = \tilde{x}_0,\end{aligned}$$

где $\Delta x(k) = \tilde{x}(k) - \hat{x}(k)$, $\hat{x}(k)$ – оценочное значение вектора состояния, полученное с помощью фильтра Люенбергера; $A_{\alpha_i}, B_{\alpha_i}, D_{\alpha_i}, F_{\alpha_i}$ – матрицы чувствительности по параметру α_i; $\Delta\alpha_i = \alpha_i - \alpha_{i\text{н}}$, $\alpha_{i\text{н}}$ – номинальное значение параметра класса.

Для решения последующих задач диагностического обеспечения процедура для классов отказов повторяется.

Полученные значения матриц A, B, и C, а также данные входа $u(k)$ и выхода $\tilde{y}(k)$ аварийного объекта используют для воспроизведения текущих значений оценки $\hat{y}(k)$ с помощью фильтра Люенбергера. Затем, имитируют в реальном, полунатурном или машинном объекте проявление физических видов отказов из множества D и полученные значения сигналов обрабатываются по следующему правилу:

$$\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k),\ \forall k,\ k \in T;$$

$$s_{ij} == \begin{cases} 1\ \text{при} \sum\limits_k \left|\Delta y_j(k)\right| \ge \delta_{j0} \\ 0\ \text{при} \sum\limits_k \left|\Delta y_j(k)\right| < \delta_{j0};\ \forall k \in T;\ j = \overline{1,m}, \end{cases}$$

где T – множество дискретных значений моментов времени, соответствующих интервалу наблюдения; $\Delta y_j(k)$ –

величина j-й координаты вектора $\Delta y(k)$; δ_{j0} – пороговое значение допустимого изменения j-й координаты.

Полученные значения переменной s_{ij} позволяют отобразить результаты исследований с помощью таблицы влияния отказов (ТОВ), представляющей собой наиболее распространенную разновидность логических диагностических моделей (ЛДМ). ТВО формируется как для тестового режима функционирования объекта, когда подаются специально организованные управляющие воздействия $u(k)$, так и для функционального режима при подаче рабочих воздействий $u(k)$.

ЛДМ используют аналогичным образом для определения оптимальной совокупности признаков при решении и других основных задач диагностирования: поиска места отказа, определение класса отказа и установления вида отказа. Это дает возможность уменьшить сложность алгоритмического обеспечения диагностирования и как следствие, повысить оперативность получаемого диагноза, что принципиально важно для активного отказоустойчивого управления в реальном масштабе времени.

Работоспособность динамического объекта характеризуется выполнением ряда требований, например, по запасам устойчивости, времени переходного процесса, точности и др. Отказ в объекте приводит к нарушению его работоспособности. Для обеспечения отказоустойчивости динамический объект должен обладать способностью восстанавливать свою работоспособность при появлении отказов из заданного множества. Восстановить работоспособность означает в буквальном смысле «вернуть» характеристики в диапазоны, соответствующие нормальному функционированию объекта, посредством сигнальной или параметрической подстроек, замены полностью отказавших элементов исправными, использования вместо сигналов отказавших датчиков, восстановленных по показаниям других датчиков, оценочных значений, перехода на другие алгоритмы управления, применение других избыточных ресурсов.

Описанные структуры МДМ могут быть применены для решения задач по восстановлению работоспособности. Рассмотрим для ССОС возможность использования МДМ для обнаружения отказов. Предположим, что в объекте произошел отказ и этот отказ диагностирован. Пусть эта аномалия характеризуется параметром γ_i, тогда машинная диагностическая ML-модель описывается следующим образом:

$$\begin{aligned}&\Delta x(k+1)=G\Delta x(k)+A\gamma_i\hat{x}(k)\Delta\gamma_i+\\&+B\gamma_i u(k)\Delta\gamma_i;\\&\Delta y(k)=C\Delta x(k);\ \Delta x(k_0)=\tilde{x}_0.\end{aligned}\tag{1}$$

Преобразуем уравнения (1) к виду

$$\begin{aligned}&\Delta y(k+1)=CG\Delta x(k)+\\&+C\left[A\gamma_i, B\gamma_i\right]\left[\hat{x}(k)\quad u(k)\right]^T\Delta\gamma_i.\end{aligned}$$

В силу того, что матрица G может быть выбрана диагональной с одинаковыми собственными значениями, а матрица C в канонической наблюдаемой форме имеет коэффициенты 0 или 1, первое слагаемое можно представить в такой форме: $G'\Delta y(k)$, где G – диагональная матрица с теми же собственными значениями, но $\dim G'-(m\times m)$. Во втором слагаемом обозначим матрицу $C\left[A\gamma_i\ B\gamma_i\right]=L\gamma_i$ и введем вектор сигналов $\vartheta^T_{\gamma_i}(k)=\left[\hat{x}(k)\ u(k)\right]$. Тогда с учетом новых обозначений

$$\begin{aligned}&\Delta y(k+1)=G'\Delta y(k)+L_{\gamma_i}J_{\gamma_i}\Delta\gamma_i;\\&\Delta y(k_0)=\tilde{y}_0.\end{aligned}\tag{2}$$

По сути, уравнение (2) описывает отклонения возмущенного движения объекта относительно эталонного поведения, воспроизводимого фильтром Люенбергера. Возмущенное движение вызвано отказом, характеризуемым $\Delta\gamma_i$. Возмущающее воздействие на объект в данном случае описывается произведением $\vartheta_{\gamma_i}(k)\Delta\gamma_i$. Матрица L_{γ_i} определяет направления передачи и величину возмущающего воздействия. Матрица G' характеризует собственную динамику процесса получения отклонений возмущенного движения. В терминах этой модели задача восстановления работоспособности объекта состоит в том, чтобы устранить отклонение $\Delta y(k)$, т. е. обеспечить выполнение условия $\lim\limits_{k\to\infty}\Delta y(k)=0$. С точки зрения теории устойчивости динамических управляемых объектов выполнение такого условия означает асимптотическую устойчивость движения скорректированного объекта относительно его эталонной модели.

Для устранения отклонения $\Delta y(k)$, вызванного возмущением $\vartheta_{\gamma_i}(k)\Delta\gamma_i$, требуются соответствующие устройства автоматической стабилизации, выполняющие сигнальную, параметрическую подстройки или реконфигурацию структуры на основании отклонения $\Delta y(k)$. В общем случае контур такого восстановления работоспособности описывается уравнениями

$$\begin{aligned}&\Delta y(k+1)=G'\Delta y(k)+L\gamma_\text{i}F\left[\delta(k)\right];\\&\delta(k+1)=\delta(k)+\psi(k)T_0,\end{aligned}\tag{3}$$

где $F[\cdot]$ – вектор нелинейных функций устройства стабилизации; $\delta(k)$ – вектор управляющих воздействий стабилизатора; $\psi(k)$ – вектор формирования управляющих воздействий; T_0 – период квантования.

Вектор $F[\cdot]$ отражает ограниченные возможности восстановления и описывает функции соответствующих устройств.

При использовании сигнальной подстройки для восстановления работоспособности функция $F[\cdot]$ описывает алгоритм устройства, генерирующего дополнительный сигнал к управляющему воздействию $u(k)$. При параметрической подстройке функция $F[\cdot]$ описывает закон изменения подстраевоемого параметра. Если выполняется реконфигурация алгоритмов или аппаратуры, то $F[\cdot]$ описывает функции соответствующих коммутаторов, отключающих отказавшие элементы и подключающих резервные. При использовании уравнений (3) для формирования управляющих воздействий $\delta(k)$ в целях обеспечения асимптотического убывания к нулю вектора отклонений $\Delta y(k)$ наиболее приемлемы методы синтеза с помощью функций А. М. Ляпунова.

Таким образом, более физично и целесообразно для синтеза контуров восстановления работоспособности динамических объектов, а также для оценки качества функционирования отказоустойчивого объекта использовать критерий в форме функций Ляпунова

$$V[\Delta y(k)] = \Delta y^T(k) Q \Delta y(k);$$
$$V[\Delta y(k)] = \|\Delta y(k)\|, \tag{4}$$

где Q – симметричная, положительная матрица; $\|\Delta y(k)\|$ – норма вектора $\Delta y(k)$.

Эти функции по сути своей характеризуют устойчивость динамического объекта к сигнальным и параметрическим возмущениям, вызванным действием видов отказов. В связи с этим функции Ляпунова можно использовать в качестве критериев функциональной отказоустойчивости, как блоков, так и всей ССОС в целом.

4. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ ДФС

С помощью МДМ можно разрабатывать алгоритмы модулей (рис. 1) для определения таких характеристик ССОС как момент появления отказа, его место, класс и конкретный физический вид, т. е. полный диагноз. В обобщенном виде классы МДМ можно описать следующим образом:

$$\Delta x(k+1) = G\Delta x(k) + $$
$$+ [A\hat{x}(k) + Bu(k)]\Delta\lambda;$$
$$\Delta y(k) = C\Delta x(k) + [Du(k) + F]\Delta\lambda;$$
$$x(k) = \tilde{x}, \tag{5}$$

где $\lambda_i \in \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$, $i=\overline{1,\pi}$ и λ_i – обобщенный прямой диагностический признак отказа.

Решение обратной задачи для системы уравнений (5) в общем случае не представляется возможным в силу трудности обращения прямоугольных матриц, так как $\dim C = m \times n$, а $m < n$ или $m > n$. В частном случае, когда $\dim C = n \times n$, т. е. вектор состояния полностью измеряем это возможно. Как показали исследования на конкретных диагностических объектах, в этом нет практической необходимости. Более простой и эффективный путь определения оценочных значений прямого признака $\Delta\lambda_i$ базируется на таком обстоятельстве. Уравнение в системе (5) векторно-матричное, а параметр $\Delta\lambda_i$ – скалярный. В векторном уравнении состояния n скалярных уравнений, так как $\dim x(k) = n$, а в векторном уравнении выхода, в силу того, что $\dim y(k) = m$, будет m скалярных уравнений. Таким образом, в сумме получается $n+m$ скалярных уравнений, связывающих сигналы с неизвестным прямым признаком $\Delta\lambda_i$. Поэтому существует принципиальная возможность из всей совокупности линейных скалярных уравнений выбрать такие самые простые по структуре, которые позволяют получить разрешение относительно неизвестного параметра $\Delta\lambda_i$. Выбор более простых по структуре уравнений позволяет минимизировать количество вычислительных операций в алгоритме получения $\Delta\hat{\lambda}_i$, а следовательно, способствует повышению оперативности получения диагноза и уменьшению вычислительных ресурсов.

При решении основных задач диагностирования динамического объекта нужно учитывать следующее. При установлении факта отказа, поиске его места и определении класса (рис. 5) используется дихотомическое дерево, представляющее собой продукционную базу знаний процесса диагностирования. В узлах такого дерева используются предикатные конструкции двузначного типа

$$z = s_2\{f[\Delta y(k)] - \delta\} =$$
$$= \begin{cases} 1, & \text{если } f[\cdot] \geq \delta; \\ 0 & \text{если } f[\cdot] < \delta; \forall k \in T, \end{cases}$$

где δ – пороговое значение; $f[\Delta y_i(k)]$ – нелинейная функция от компонент вектора измерений $\Delta y(k)$.

В качестве аргументов двузначного предиката используются дискретные значения отклонения измерений выходных сигналов динамического объекта, размещенные в векторе $\Delta y(k)$, функциональная связь этих измерений, а также пороговое значение, определяющее допустимое изменение функции $f[\cdot]$. Нелинейная функция $f[\cdot]$ формируется с помощью МДМ, связывающей конкретный для каждой основной задачи диагностирования прямой признак $\Delta\lambda_i$ с косвенным – результатами вычисления $\Delta y(k)$.

Координация функционирования модулей производиться с помощью соответствующих процедур, зависящих от организации вычислительного процесса в блоках и во всей спутниковой системе ориентации и стабилизации в целом.

5. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МВР

Для успешного восстановления работоспособности динамического объекта в конструкции должны быть избыточные средства, такие как: а) дополнительные сигнальные входы; б) средства параметрической подстройки; в) избыточные приборы, агрегаты, устройства;

Рис. 5. Схема разработки алгоритмического обеспечения модуля ДФС

г) дополнительные алгоритмы и программы; д) другие средства. Формирование структуры алгоритмического обеспечения модулей целесообразно проводить с использованием МДМ для обнаружения отказов. Система уравнений (3) описывает возмущенное отказом движение динамического объекта с управляющим воздействием интегрального типа. Для описания особенностей синтеза алгоритмов управления перечисленными избыточными средствами используем более общий тип уравнения – пропорциональный и тогда уравнение возмущенного отказом движения примет такой вид

$$\begin{aligned} &\Delta y(k+1) = G'\Delta y(k) + L_{\gamma_i}\psi(k); \\ &\Delta y(k_0) = \tilde{y}_0. \end{aligned} \qquad (5)$$

С учетом таких, более простых для последующего изложения обозначений $G' = R$, $L_{\gamma_i} = T$ представим уравнение так

$$\begin{aligned} &\Delta y(k+1) = R\Delta u(k) + T\psi(k); \\ &\Delta y(k_0) = \tilde{y}_0,\ \Delta y(k) \in \Omega, \end{aligned} \qquad (6)$$

где Ω – множество точек связанной конечной области пространства состояния, содержащее в себе начало координат и некоторую ее конечную окрестность.

Управляющее воздействие $\psi(k)$ определим с помощью дискретного аналога второго метода А. М. Ляпунова, позволяющего получить условия асимптотической устойчивости в некоторой области или в целом при появлении соответствующих используемым резервным средствам, физических видов отказов. Второй метод Ляпунова, как известно, заключается в формировании специальной вспомогательной скалярной функции, называемой функцией Ляпунова $V[\Delta y(k)]$, и исследовании ее свойств, а также свойств ее первой разности $\Delta V[k,\ k+1]$, определенной вдоль траектории уравнения (6).

Функция $V[\Delta y(k)]$ называется определенной положительной в области Ω, если всюду в этой области, кроме точки начала координат, выполняется неравенство $V[\Delta y(k)] > 0$. При выполнении неравенства $V[\cdot] < 0$ функцию называют определенно отрицательной. В общем, такие функции называются знакоопределенными. Приведем основные результаты теории устойчивости, используемые в дальнейшем изложении.

Линейная система, описываемая дискретным уравнением (6) асимптотически устойчива, когда все корни σ_i (характеристические числа) матрицы R лежат внутри круга единичного радиуса, т. е. $|\sigma_i| < 1$, $i = \overline{1, m}$. Если для системы (6) в области Ω существует определенно положительная функция $V[\Delta y(k)]$, первая разность которой $\Delta V[k,\ k+1]$, вычисленная в силу системы (6), будет определенно отрицательной, то положение равновесия будет асимптотически устойчивым, т. е. $\lim\limits_{k\to\infty} \Delta y(k) = \infty$.

Рассмотрим метод получения достаточных условий компенсации отклонений $\Delta y(k)$, вызванных физическими видами отказов, а также алгоритмов восстановления работоспособности с помощью аппарата функций Ляпунова. Качество компенсации видов отказов или восстановления работоспособности будет оцениваться с помощью функции вида

$$V[\Delta y(k)] = \Delta y^T(k) Q \Delta y(k), \qquad (7)$$

где $Q = Q^T > 0$. Такая функция определенно положительная в области Ω, следовательно, удовлетворяет требованиям функций Ляпунова.

Первую разность функции Ляпунова $\Delta V[k,\ k+1] = V[\Delta y(k+1)] - V[\Delta y(k)]$ определим с использованием уравнения (6), в результате получим:

$$\Delta V[k,\ k+1] = \Delta y^T(k)\left[R^T QR - Q\right]\Delta y(k) +$$
$$+2\Delta y^T(k)R^T QM\psi(k) + \psi^T(k)M^T QM\psi(k). \quad (8)$$

Компенсирующее воздействие $\psi(k)$ выберем из условия обеспечения в области Ω для конечной разности $\Delta V[k,\ k+1]$ выполнения следующего неравенства $\Delta V[k,\ k+1] < 0$, т. е. условия определенной отрицательности функции. Функция (8) будет определенно отрицательной при выполнении таких условий:

$$1.\ R^T QR - Q = -P, \text{ где } P = P^T > 0. \quad (9)$$

$$2.\ 2\Delta y^T(k)R^T QM\psi(k) +$$
$$+\psi^T(k)M^T QM\psi(k) = 0. \quad (10)$$

Первое условие можно выполнить, если задать матрицу P как квадратную диагональную и положительную. Тогда из матричного равенства (9) вычисляют матрицу Q, удовлетворяющую требованию $Q = Q^T > 0$. Выполнение второго условия (10) связано с выбором вектора компенсирующего воздействия $\psi(k)$, обеспечивающего нулевое значение суммы двух слагаемых в области Ω. Преобразуем равенство (10)

$$\left[2\Delta y^T(k)R^T QM + \psi^T(k)M^T QM\right]\psi(k) = 0. \quad (11)$$

Из (11) следуют два условия:

$$1.\ \psi(k) = 0;$$
$$2.\ \psi^T(k) = -2\Delta y^T(k)R^T QM\left[M^T QM\right]^{-1}. \quad (12)$$

Первое решение – тривиальное и не применимо для компенсации последствий отказа. Второе решение представляет собой алгоритм формирования векторного компенсирующего воздействия, обеспечивающего асимптотическую устойчивость относительно значения $\Delta y(k) = 0$ в области Ω. Другими словами, алгоритм (12) обеспечивает компенсацию последствий физического вида отказа, т. е. восстановление работоспособности динамического объекта.

Убедиться в свойствах компенсирующего воздействия можно путем подстановки выражения для вектора $\psi(k)$ в систему (6). Для большей наглядности рассмотрим частный случай, когда компенсирующее воздействие скалярное, тогда M=m и после соответствующих преобразований получаем, что

$$\Delta y(k+1) = \left[R - 2\frac{mm^T QR}{m^T Qm}\right]\Delta y(k). \quad (13)$$

Далее, если вектор t имеет m ненулевую компоненту, а матрица $R = \delta I$, причем $|\delta| < 1$, т. е. корни матрицы лежат внутри единичного круга, тогда все корни новой матрицы кроме m-го будут равны $-\delta$, а m-й корень равен δ. Так как δ ограничен по модулю, то все корни лежат внутри единичного круга, а следовательно, такая система асимптотически устойчива.

Произвольность в выборе структуры функций Ляпунова позволяет получать различные алгоритмы восстановления работоспособности динамического объекта, отличающиеся структурой и качественными показателями динамики компенсации последствий действий физических видов отказов. С целью унификации разработки алгоритмического обеспечения модулей восстановления работоспособности динамических объектов разработан подход, систематизирующий необходимые этапы и их взаимосвязь. На рис. 6 этот подход представлен графической схемой.

Приведенная схема представляет собой эскиз структуризации способа решения задачи разработки алгоритмического обеспечения. При решении конкретных задач эта схема дополнится специфическими для каждого

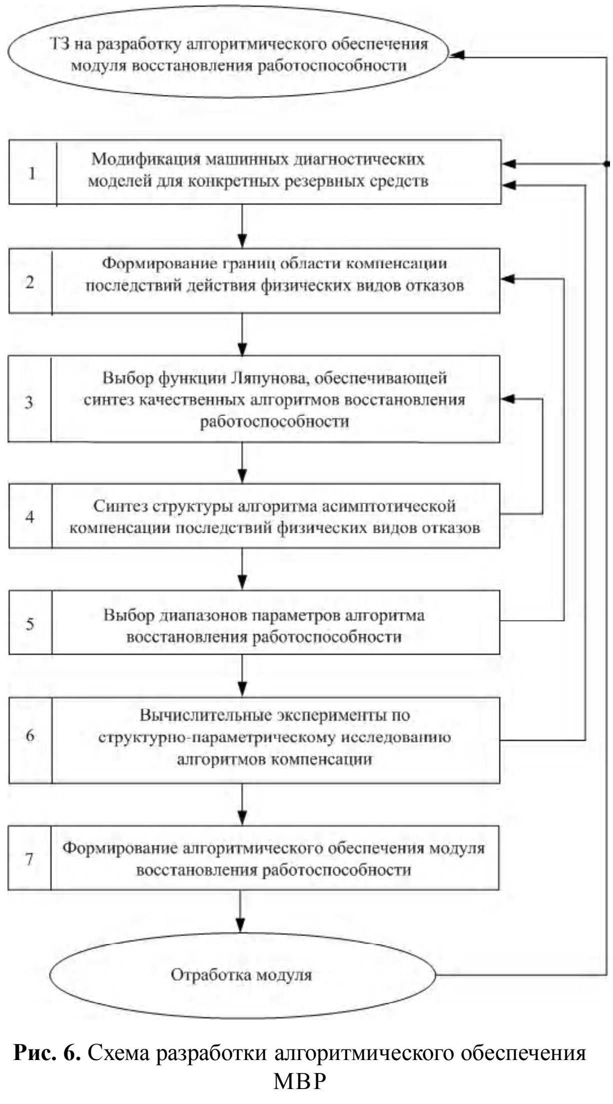

Рис. 6. Схема разработки алгоритмического обеспечения МВР

используемого резервного средства этапами и соответствующими связями, но предложенная схема будет ядром этой новой структуризации.

Этапы в приведенной схеме представлены как самостоятельные задачи, при решении которых используются соответствующие модели и методы их использования. Ряд этих задач в более общей постановке и методы их решения описаны в известных работах, задачи этапов 1, 2, 5, 6 и 7 – это новые специфические задачи, методы решения которых базируются на использовании модифицированных МДМ.

Предложенная схема разработки позволяет упорядочить технологию разработки достаточно нового алгоритмического обеспечения для модулей, производящих восстановление работоспособности динамических объектов в нештатных ситуациях, посредством более гибкого и эффективного использования бортовых избыточных ресурсов. Благодаря результатам автономного глубокого диагностирования в реальном масштабе времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования введено понятие и предложено математическое описание динамического объекта диагностирования и восстановления работоспособности, позволяющие унифицировано и адекватно описывать в типовых блоках и в спутниковой системе как процесс развития нештатных ситуаций, так и процесс их парирования. Кроме того, предложена четырехуровневая схема параметризации прямых признаков отказов, позволившая структурировать процедуры формирования прямых признаков видов отказа, их классов, мест и факта появления отказов в динамических объектах, а также представлен класс ДФМ и класс ЛФМ, связывающих прямые диагностические признаки с косвенными.

Сведена разработка диагностического обеспечения к разработке алгоритмического обеспечения типового модуля ДФС. Изложены модели и средства восстановления работоспособности ССОС с помощью модифицированных диагностических моделей и с использованием второго метода А.М. Ляпунова. Сформирована схема разработки алгоритмического обеспечения типового МВР ССОС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники [Текст] : учеб. пособие / А. И. Батырев, Б. И. Батырев, Г. К. Бандарец и др. ; под общ. ред. Ю. М. Златкина, В. С. Кривцова, А. С. Кулика, В. И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. Ин-т», НПП «Хартон-Аркос», 2008. – 501 с.
2. *Бровкин, А. Г.* Бортовые системы управления космическими аппаратами [Текст]: Учебные пособия / А. Г. Бровкин, Б. Г. Бурдычов, С. В. Гордийко и др. ; под ред. А. С. Сырова – М. МАИ С. В-ПРИНТ, 2010. – 340 с.
3. *Кулик, А. С.* Концепция обеспечения живучести спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией [Текст] / А. С. Кулик, О. А. Лученко, С. Н. Фирсов // Радиоелектроника, информатика, управление. – 2011. – №2 (25). – С. 41–47.
4. *Кулик, А. С.* Содержание задач по обеспечению отказоустойчивости, решаемых в процессе разработки системы управления угловым движением космического летательного аппарата [Текст] / А. С. Кулик, О. А. Лученко, О. И. Гавриленко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2005. – № 1 (13). – С.154–161.
5. *Кулик, А. С.* Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А. С. Кулик. – Х. : Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2012.

Кулік А. С., Лученко О. О., Фірсов С. М.

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДУЛІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ

Наведено уніфікований опис процесів в типових блоках та в супутниковій системі, як процесів розвитку позаштатних ситуацій, так і процесів їхнього відбивання. Крім того запропонована чотирирівнева схема відбивання прямих ознак відмов. Представлені моделі та засоби відновлення працездатності супутникових систем.

Ключові слова: супутникова система орієнтації та стабілізації, надмірність, датчик.

Kulik A. S., Luchenko O. O., Firsov S. N.

ALGORITHMIC SOFTWARE OF DIAGNOSE AND SERVICEABILITY OF ATTITUDE AND STABILIZATION SATELLITE SYSTEM RESTORATION MODULES

Unified description of the processes in the model blocks and the satellite system as a process of development of abnormal situations and process of it's parry is presented. In addition, four-level scheme of parameterization of the direct criterion of failure is offered. Models and tools of satellite systems serviceability restoration are presented.

Key words: attitude and stabilization satellite system, redundancy, sensors.