

УДК 519.873: 62-50(047)

А.С. КУЛИК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

КОНЦЕПЦИЯ АКТИВНОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

Предложена концепция активного отказоустойчивого управления в нештатных ситуациях, базирующаяся на принципах: трехуровневой иерархии обеспечения активной отказоустойчивости; диагностирования с глубиной до устранимой причины отказа; восстановления работоспособности посредством гибкого управления избыточными ресурсами. Описана суть глубокого диагностирования на основе использования диагностических функциональных и логических моделей, позволяющих последовательно снимать неопределенность события, вызванного отказом. Даны представления о гибком восстановлении работоспособности объекта диагностирования. Приведены сведения об экспериментальных исследованиях на лабораторных макетах блоков и на стенде спутниковой системы стабилизации и ориентации.

Ключевые слова: отказ, нештатная ситуация, глубокое диагностирование, диагностические функциональные модели, диагностические логические модели, диагностируемость, сигнально-параметрический подход, гибкое восстановление работоспособности, компенсируемые отказы, некомпенсируемые отказы, активная отказоустойчивость, спутниковые системы.

Введение

Современные спутниковые системы стабилизации и ориентации представляют собой сложные и многофункциональные комплексы, эксплуатирующиеся 10 – 15 лет. Существенная масштабность, гетерогенность и уникальность этих систем обуславливает их уязвимость к действию таких дестабилизирующих факторов, как различные поломки, неисправности, сбои, а в общем *отказы. Нештатные ситуации*, вызываемые отказами, свидетельствуют о несовершенстве проектируемых спутниковых систем. Основная причина несовершенства – низкий «интеллектуальный уровень» систем при парировании отказов. Повысить этот уровень возможно приданием системе новых функциональных свойств таких, как *глубокое диагностирование* и *гибкое восстановление работоспособности*, а в целом свойств *активной отказоустойчивости*. Внедрение активного отказоустойчивого управления вместо мажоритарного в практику проектирования открывает новые возможности по существенному уменьшению массо-габаритных, энергетических и стоимостных характеристик систем и продлению ресурса их функционирования, т.е. повышению технико-экономической эффективности всего космического проекта. Исследования по активной отказоустойчивости систем имеют определенную историю [1 – 9], но достигнутые теоретические результаты еще далеки от эффективных внедрений.

Принципы обеспечения активной отказоустойчивости

В основу концепции положено три принципа: первый – *трехуровневая иерархия* обеспечения активной отказоустойчивости; второй – *глубокое диагностирование* причин отказов; третий – *гибкое восстановление работоспособности*.

Использование первого принципа приводит к формированию блокового, системного и надсистемного уровней обеспечения активной отказоустойчивости. Из всего множества критических для системы видов отказов $D = \{d_i\}_1^q$ выбираются виды отказов $d_i \in D_1 \subset D$, которые могут быть устранены – парированы на уровне функциональных блоков: датчиков, сервоприводов, регулятора. Подмножество D_1 формируется исходя из имеющихся избыточных ресурсов. Для системного уровня формируется подмножество видов отказов $D_2 \subset D$, парируемых с помощью средств системной избыточности. На третьем, надсистемном уровне парируются виды отказов из подмножества $D_3 \subset D$ с помощью внесистемных средств избыточности, например, изменение режима функционирования спутника и ряда других.

Принцип *глубокого диагностирования* заключается в поиске конкретных парируемых видов отказов $d_i, i = \overline{1, q}$ на основании доступных измере-

ний. Глубокое диагностирование осуществляется на каждом уровне обеспечения отказоустойчивости.

Принцип *гибкого восстановления работоспособности* состоит в формировании для каждого вида отказа возможных вариантов выхода из нештатной ситуации с помощью избыточных средств. Процедуры восстановления работоспособности формируются исходя из моделей функционирования объекта диагностирования и с учетом избыточных ресурсов.

Использование описанных принципов приводит к новой структуре спутниковых систем (рис. 1).

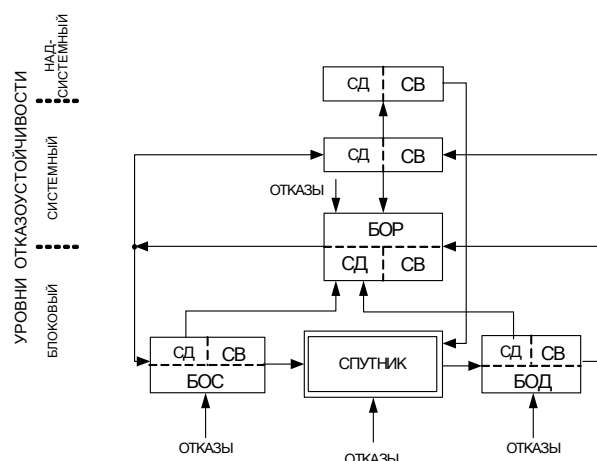


Рис. 1. Блок-схема системы с активным отказоустойчивым управлением в нештатных ситуациях

На первом блоковом уровне система состоит из спутника, блока отказоустойчивых датчиков (БОД), блока отказоустойчивых сервоприводов (БОС) и блока отказоустойчивых регуляторов (БОР), включающих в себя средства диагностирования (СД) и средства восстановления (СВ) работоспособности в нештатных ситуациях. На системном уровне осуществляются процедуры диагностирования и восстановления с помощью системных избыточных средств. На третьем, надсистемном уровне диагностируется качество функционирования нижних уровней и восстанавливается работоспособность с помощью имеющихся ресурсов.

Глубокое диагностирование

Разработка процедур глубокого диагностирования базируется на двух типах диагностических моделей. Первый тип – это *диагностические функциональные модели* (ДФМ), связывающие отклонения прямых и косвенных диагностических признаков, второй – *диагностические логические модели* (ДЛМ), отражающие качественную связь между диагностическими признаками [6]. Так, нештатный

режим функционирования линеаризованного объекта диагностирования с существенными нелинейностями при действии отказов описывается в форме Коши таким векторным уравнением возмущенного движения:

$$\dot{\tilde{y}}(t) = A(\lambda)\tilde{y}(t) + B(\lambda)F[\lambda, u(t)]; \tilde{y}(t_0) = \tilde{y}_0, \quad (1)$$

где $\tilde{y}(t)$ – вектор измеряемых переменных возмущенного движения;

$\tilde{y}(t) \in Y^n$; $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ – матрицы соответствующих размерностей, характеризующие линеаризованную часть объекта диагностирования;

λ – μ -мерный вектор диагностических параметров отказов;

$F[\lambda, u(t)]$ – r -мерная векторная функция, описывающая существенные статические нелинейности объекта диагностирования; $u(t)$ – r -мерный вектор входного сигнала; $u(t) \in U^r$.

Для рассматриваемого нелинейного объекта диагностирования можно сформировать несколько типов ДФМ. Представим, к примеру, диагностическую модель для «малых» отказов ($\Delta\lambda_i \gg \Delta\lambda_i^2$), так называемую MLC-модель:

$$\Delta\dot{y}(t) = G\Delta y(t) + \frac{\partial A(\lambda)}{\partial \lambda_i} \hat{y}(t) \Delta\lambda_i + \frac{\partial B(\lambda)}{\partial \lambda_i} F[\lambda_{ин}, u(t)] \Delta\lambda_i + B \frac{DF[\lambda, u(t)]}{\partial \lambda_i} \Delta\lambda_i; \quad (2)$$

$$\Delta y(t_0) = \tilde{y}_0,$$

где $\Delta y(t)$ – косвенный диагностический признак $\Delta y(t) = \tilde{y}(t) - \hat{y}(t)$, $\hat{y}(t)$ – выход эталонной модели;

$\Delta\lambda_i$ – прямой диагностический признак $\Delta\lambda_i = \lambda_i - \lambda_{ин}$, $\lambda_{ин}$ – номинальное значение параметра отказа;

G – люенбергеровская матрица;

$\frac{\partial[\cdot]}{\partial \lambda_i}$ – частная производная;

$\frac{D[\cdot]}{\partial \lambda_i}$ – обобщенное дифференцирование.

Принципиальным вопросом при разработке диагностического обеспечения является создание условий *диагностируемости*, заключающихся в возможности установления факта наличия прямого диагностического признака любого отказа из заданного множества по доступным наблюдениям косвенным диагностическим признакам в течение конечного интервала времени. Разработан ряд критериев диагностируемости, позволяющих оценивать качество разработанных диагностических моделей.

Так, для приведенных MLC-моделей связь между косвенными и прямыми признаками представима так:

$$\Delta y(t) = V_i(t) \Delta \lambda_i, \quad (3)$$

где $V_i(t)$ – функция чувствительности, определяемая в результате решения следующего уравнения, вытекающего из MLC-модели:

$$\dot{V}_i(t) = G V_i(t) + \frac{DH[\lambda_i, \tilde{y}(t), u(t)]}{\partial \lambda_i}; \quad (4)$$

$$V_i(t_0) = V_{i0}.$$

Критерий диагностируемости. Объект диагностирования с существенными нелинейностями полностью диагностируем в малом тогда и только тогда, когда функции чувствительности $V_i(t)$, $i = \overline{1, \mu}$ линейно независимы во всех попарных сочетаниях.

Критерии диагностируемости позволяют не только оценить степень диагностируемости объекта, а при частичной диагностируемости сформировать пути и средства обеспечения полной диагностируемости [6].

В общем случае связь между прямыми и косвенными диагностическими признаками нелинейная (3) и поэтому для перехода к качественным моделям используются различные преобразования признака $\Delta y(t)$ к числовому признаку η_j и далее для перехода от абсолютной шкалы признаков к шкале наименований используются двузначные предикатные уравнения

$$Z_j = S_2(\eta_{ij} - \delta_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta_{ij} \geq \delta_i; \\ 0, & \text{если } \eta_{ij} < \delta_i; \end{cases} \quad j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

где $S_2(\cdot)$ – символ двузначного предиката;

δ_i – пороговое значение, зависящее от точности представления и последующей обработки данных.

Последовательно применяя это уравнение, получают прямоугольную булеву таблицу размером $\mu \times m$. Число строк таблицы соответствует числу прямых признаков отказа $\Delta \lambda_i$, а число столбцов – размерности вектора косвенных признаков $\Delta y(k)$. Эта таблица представляет собой разновидность ДЛМ, названную табличной логической моделью – TL-моделью.

Математические ДФМ и ДЛМ разработаны для классов нелинейных и линейных систем, а также систем с существенными нелинейностями как для «малых», так и для «больших» отказов.

Диагностические модели дали возможность разработать новый *сигнально-параметрический подход* [5], позволивший аналитически решать такие основные задачи глубокого диагностирования как

обнаружение отказов, поиск места их возникновения, установление класса отказа и определение его вида (рис. 2).

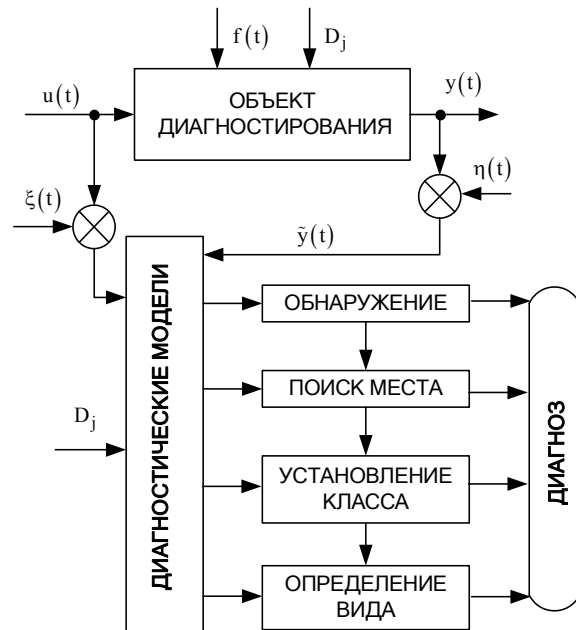


Рис. 2. Структура сигнально-параметрического глубокого диагностирования

Сигнально-параметрический подход базируется на предположении, что возникновение в объекте диагностирования любого вида отказа $d_i \in D_j$ представляет собой неопределенное событие с точки зрения момента его появления, места возникновения, принадлежности к какому-то классу и конкретного вида проявления. Снятие неопределенности этого события осуществляется посредством вычисления для каждой задачи прямых признаков отказа по доступным измерению косвенным признакам объекта диагностирования. В качестве базовой структуры для *последовательного снятия неопределенности* в нештатной ситуации выбрано дихотомическое дерево поиска соответствующих основным задачам диагностических признаков отказов. Дихотомические деревья строятся с использованием ДЛМ и представляют собой основу для формирования компьютерной продукционной базы знаний процесса глубокого диагностирования [6, 7, 10, 11].

Гибкое восстановление работоспособности

Причинами нештатных ситуаций в спутниковых системах являются отказы датчиков, сервоприводов и спутника. Возникновение отказов в датчиках приводит к искажению или потере измерительной информации, поэтому восстановление измерительной информации производится с помощью

имеющихся на борту программно-аппаратных избыточных ресурсов. При нештатном режиме исполнительных органов осуществляется восстановление работоспособности всей системы посредством использования избыточных исполнительных органов, параметрической и сигнальной подстроек. Поломки в спутнике могут компенсироваться алгоритмическими средствами. Возможные в спутниковой системе отказы представлены двумя типами: *компенсируемые* и *некомпенсируемые* отказы. Для парирования компенсируемых отказов разработаны методы и средства сигнальной и параметрической подстроек. Некомпенсируемые отказы парируются посредством реконфигурации алгоритмов управления и избыточной аппаратуры.

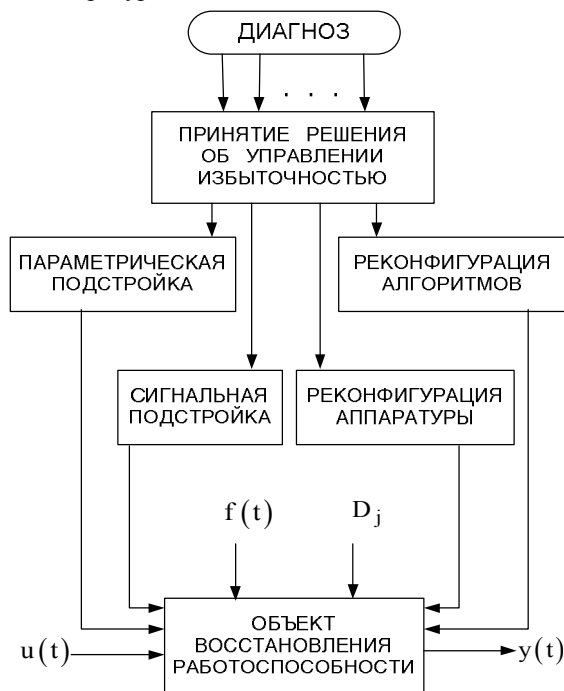


Рис. 3. Структура гибкого восстановления работоспособности

При синтезе алгоритмов парирования как компенсируемых, так и некомпенсируемых отказов используется дискретный аналог второго метода А.М. Ляпунова, позволяющий осуществлять как

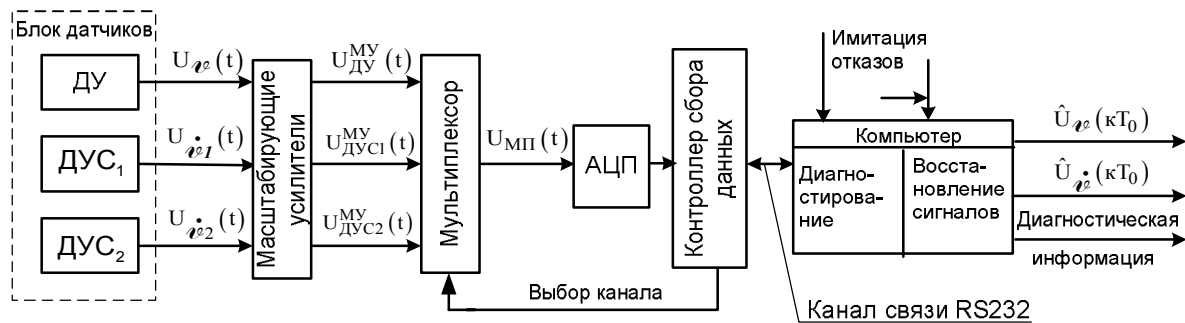


Рис. 5. Функциональная схема БОДа по каналу тангажа

структурный, так и параметрический синтез алгоритмов восстановления работоспособности системы и обеспечивать классически необходимое условие работоспособности – устойчивость [7, 9].

Экспериментальные исследования

Описанная концепция, подходы, методы и средства обеспечения отказоустойчивости формировались в результате экспериментальных исследований на лабораторных макетах [8, 10]. Для примера рассмотрим лабораторный макет БОДа.

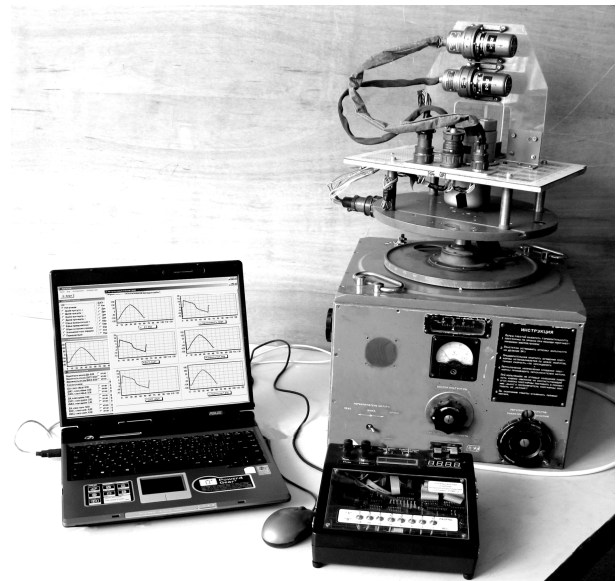


Рис. 4. Лабораторный макет для исследования БОДа

В макете используются гироскопические датчики угла (ДУ) и датчики угловых скоростей ДУС₁ и ДУС₂, осуществляющие измерения угловых эволюций по каналу тангажа спутника. На рис. 5 представлена функциональная схема макета.

На макете исследовались 37 сценариев нештатных ситуаций и обрабатывались процедуры их диагностирования и восстановления измерений.

На рис. 6 представлена схема дихотомического дерева поиска причин отказов.

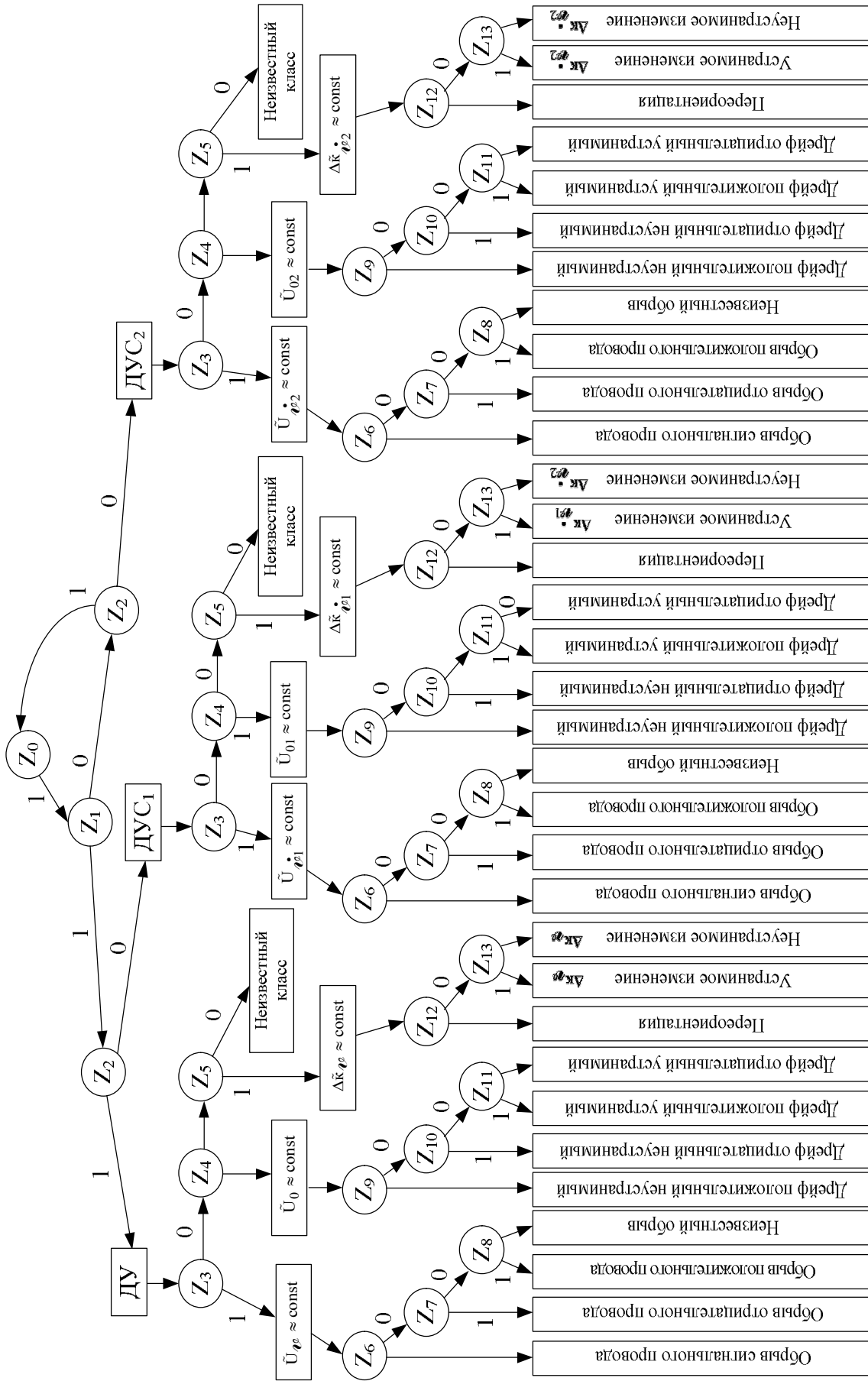


Рис. 6. Схема дихотомического дерева глубокого диагностирования видов отказов датчиков в канале тангажа

К примеру, предикат для обнаружения отказа Z_0 сформирован следующим образом

$$Z_0 = S_2 \left\{ \left| \Delta \dot{\vartheta}(k) \right| > \delta_0 \right\}; \quad k = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Отклонение угловой скорости тангажа $\Delta \dot{\vartheta}(k)$ в дискретные моменты времени вычисляются с помощью такого соотношения:

$$\Delta \dot{\vartheta}(k) = \frac{\tilde{U}_{\vartheta}(k+1) - \tilde{U}_{\vartheta}(k)}{k_{\vartheta} T_0} - \frac{1}{2} \left[\frac{\tilde{U}_{i_1}(k)}{k_{i_1}} + \frac{\tilde{U}_{i_2}(k)}{k_{i_2}} \right], \quad (7)$$

где $\tilde{U}_{\vartheta}(k)$, $\tilde{U}_{i_1}(k)$, $\tilde{U}_{i_2}(k)$ – дискретные значения выходных напряжений датчиков, соответственно угла и угловых скоростей; k_{ϑ} , k_{i_1} , k_{i_2} – коэффициенты преобразования датчиков, соответственно угла и угловых скоростей; T_0 – период квантования.

Для гибкого диагностирования сигналов отказавших датчиков в лабораторном макете использовались

- 1) приборная избыточность (2 ДУСа);
- 2) функциональная ($\vartheta(t) = \frac{d\vartheta(t)}{dt}$);
- 3) алгоритмическая (сигнальная и параметрические подстройки).

Восстановление сигналов осуществлялось с помощью такого уравнения

$$\hat{U}_{\lambda}(k) = \rho_1 \tilde{U}_{\lambda}(k) + \rho_2 \hat{U}_0^{\lambda} + \rho_3 \tilde{U}'_{\lambda}(k); \quad k \in K, \quad (8)$$

где ρ_1 и ρ_2 – параметры параметрической и сигнальной надстройки; ρ_3 – параметры подключения исправного датчика; $\tilde{U}_{\lambda}(k)$ – сигнал с отказавшего датчика; \hat{U}_0^{λ} – оценочное значение дрейфа аварийного датчика; $\hat{U}'_{\lambda}(k)$ – оценочное значение сигнала, полученное с других исправных датчиков.

Аналогично проводились исследования на макете БОСа, состоящего из четырех двигателей-маховиков (рис. 7).

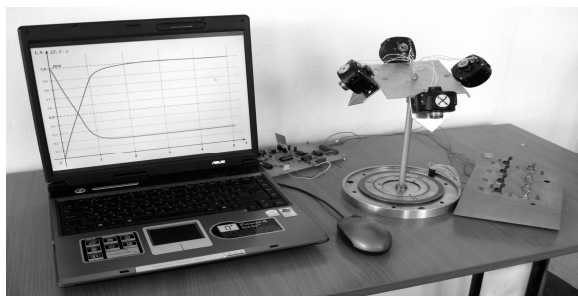


Рис. 7. Лабораторный макет для исследования БОСа с использованием двигателей-маховиков

На макете полунатурного моделирования (рис. 8) проводились исследования нештатных си-

туаций, вызванных отказами конструкции спутника, и обрабатывались процедуры диагностирования и восстановления работоспособности спутниковой системы.



Рис. 8. Общий вид стеновой спутниковой системы

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о конструктивности описанной концепции и эффективности использованных методов и средств обеспечения активной отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации при макетных экспериментах (рис. 9).

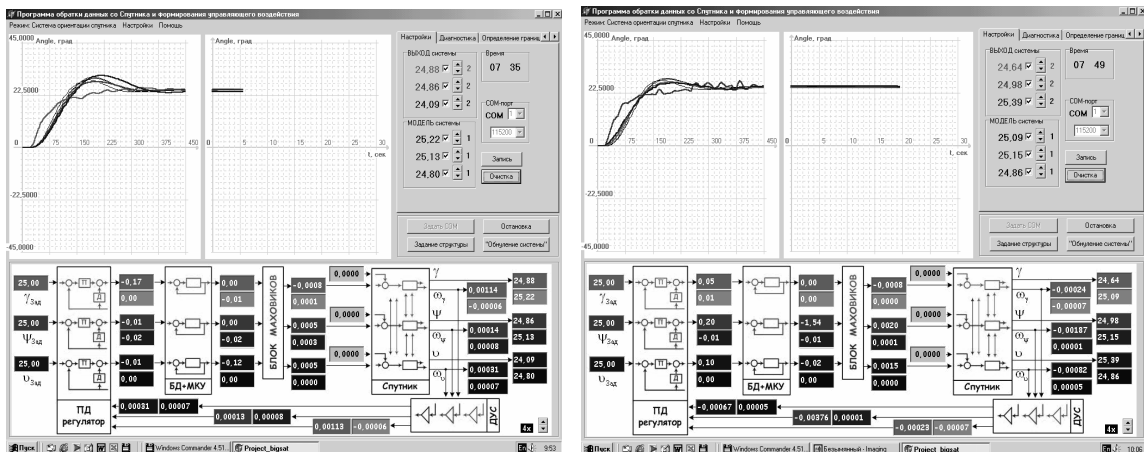
Заключение

Необходимость долговременного функционирования спутниковых систем стабилизации и ориентации при ужесточающихся условиях эксплуатации обуславливает поиск новых подходов к проектированию. Перспективным представляется интеллектуализация спутниковых систем управления. На основе такого подхода предложена концепция активного отказоустойчивого управления в нештатных ситуациях.

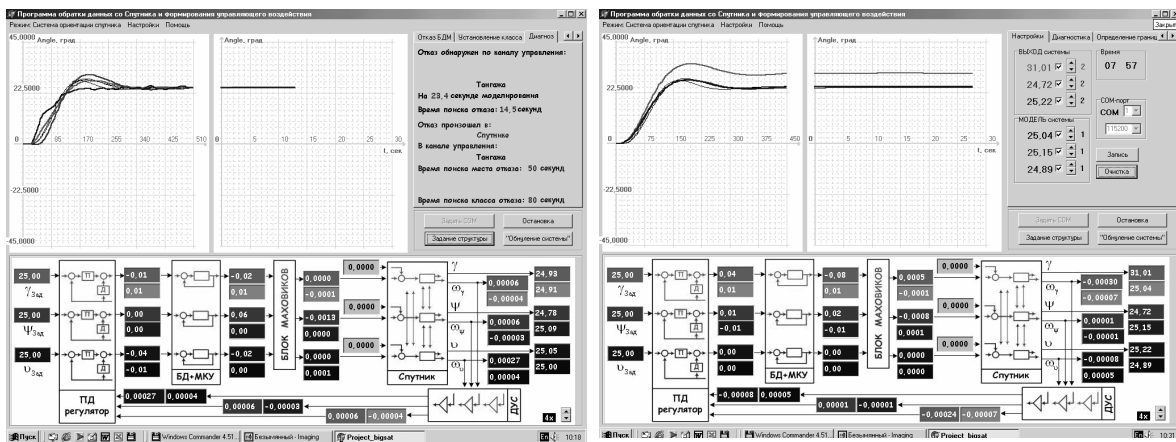
Концепция базируется на трех взаимосвязанных принципах, позволяющих потенциально обеспечивать активное парирование отказов на уровне функциональных блоков, всей системы стабилизации и ориентации, а также на уровне всего спутника.

Информацию о парируемых причинах отказов предложено получать с помощью процедур глубокого диагностирования. Эти процедуры формируются с помощью разработанных для различных классов объектов диагностических функциональных и логических моделей, позволяющих аналитически решать задачи обнаружения отказов, поиска места их возникновения, установления класса отказа и определения его вида.

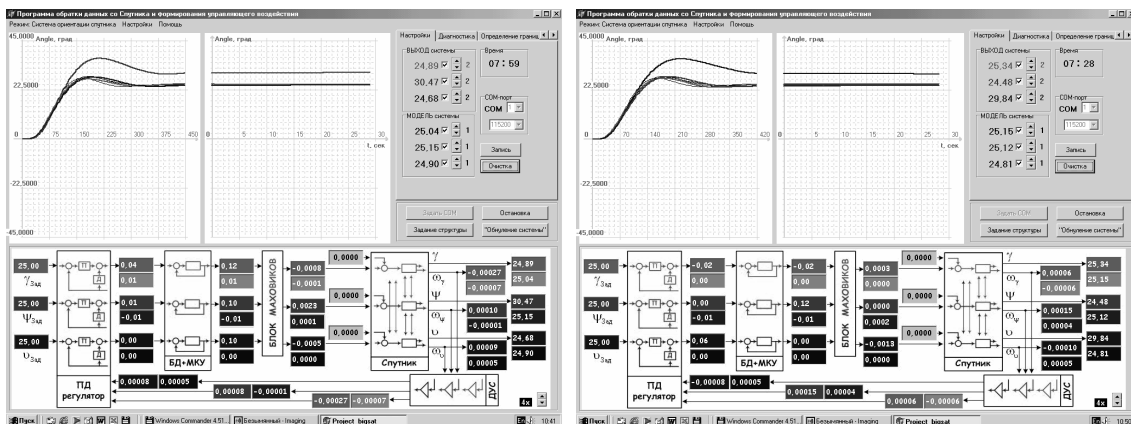
Устранение последствий отказов предложено осуществлять посредством процедур гибкого восстановления работоспособности отказавшего объекта. Эти процедуры основаны на специфическом управлении такими избыточными ресурсами, как сигнальная или параметрическая подстройка, реконфигурация алгоритмов или аппаратуры.



Изменение момента инерции I_{11} и I_{22} спутника



Изменение момента инерции I_{33} спутника и отказ ДУС₁



Отказ ДУС₁ и отказ ДУС₂

Рис. 9. Экранные формы исследований нештатных режимов

Циклы экспериментальных исследований лабораторных макетов блоков и стендовой спутниковой системы стабилизации и ориентации позволили достичь теоретически обоснованных результатов и сформировать уверенность в целесообразности предложенной концепции для повышения технико-экономической эффективности спутниковых космических проектов.

Литература

1. Beard R. *Failure Accommodation in Linear System Through Self-Reorganization* / R. Beard // *Thesis – Massachusetts Institute of Technology*. – 1971. – 376 p.
2. Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. / Isermann R. // *Springer*. – 2006. – 475 p.

3. Кулик А.С. Синтез систем, приспособляющихся к изменению параметров элементам и их отказам / А.С. Кулик, В.Г. Рубанов, Ю.Н. Соколов // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 1. – С. 96-107.
4. Kulik A.S. Fault-tolerant Dynamic Control Systems with Fault Identification / A.S. Kulik, V.I. Saliga, I.B. Sirodga // Problems of Control and Information Theory. – 1979. – Vol. 18 (1). – P. 43-54.
5. Kulik A.S. Fault Diagnosis in Dynamic Systems via Signal-Parametric Approach / A.S. Kulik // IFAC / IMACS Symposium of fault detection, supervision and a technical process – SAFE PROCESS 91, Baden-Baden. – 1991. – Vol. 1. – P. 157-162.
6. Кулик А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
7. Кулик А.С. Обеспечение отказоустойчивости систем управления: учеб. пособие / А.С. Кулик. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1991. – 90 с.
8. Kulik A. Systems Fault-Tolerant Support for a Gyroscopic-Sensor Unit / A. Kulik, F. Kozij // Engineering Simulation. – 1996. – Vol. 13. – P. 955-965.
9. Kulik A. Formation of Rational Object Control in Abnormal Models / A. Kulik // Proc. 14th East-West Fuzzy Colloquium. – 2008. – P. 154-164.
10. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники: учеб. пособие / А.И. Батырев, Б.И. Батырев, Г.К. Бондарец 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 «Хартрон-Арко», 2008. – 501 с.
11. Кулик А.С. Введение в теорию цифровых систем автоматического управления: учеб. пособие / А.С. Кулик, И.Ю. Дыбская. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 165 с.

Поступила в редакцию 17.04.2009

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой 304 А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

КОНЦЕПЦІЯ АКТИВНОЇ ВІДМОВСТІЙКОСТІ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ

А.С. Кулік

Запропоновано концепцію активного відмовостійкого управління в нештатних ситуаціях, що базується на принципах: трьохрівневої ієрархії забезпечення активної відмовостійкості, діагностуванні з глибиною до причини відмови, що можна усунути, відновлення працездатності завдяки гнучкому управлінню надлишковими ресурсами. Описано сутність глибокого діагностування на основі використання діагностичних функціональних та логічних моделей, що дозволяють послідовно знімати невизначеність щодо появи відмови. Дано представлення щодо гнучкого відновлення працездатності об'єкта діагностування. Наведено відомості о експериментальних дослідженнях на лабораторних макетах блоків та на стенді супутникової системи стабілізації та орієнтації.

Ключові слова: відмова, нештатна ситуація, глибоке діагностування, діагностичних функціональні моделі, діагностичних логічні моделі, діагностовність, сигнально-параметричний підхід, гнучке відновлення працездатності, відмови, що компенсуються, відмови, що не компенсуються, активна відмовостійкість, супутникові системи.

CONCEPTION OF ACTIVE FAULT-TOLERANCE OF SATELLITE ORIENTATION AND STABILIZATION SYSTEMS

A.S. Kulik

Conception of active fault-tolerant control in abnormal modes is offered. Such conception is based on principles of three-layer hierarchy of active fault-tolerance providing; determination of the fault type with as many details as enough to get recoverable fault reason; failure toleration by flexible redundancy using. Essence of deep diagnosing is formed by using functional and logical diagnostic models, which allow to take uncertainty down. Fundamentals of flexible recovering are given. Experimental results obtained on the satellite orientation and stabilization system units mock-up are presented.

Key words: fault, abnormal situation, deep diagnosis, diagnostic functional models, diagnostic logical models, diagnosability, flexible recovering, tolerable faults, intolerable faults, active fault-tolerance, satellite systems.

Кулик Анатолій Степанович – д-р техн. наук, профессор, заведуючий кафедрой «Системы управления летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Anatoly.kulik@gmail.com; Kulik@d3.khai.edu.