

УДК:681.5

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

¹Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Национального аэрокосмического университета им. М. Е. Жуковского «ХАИ»

²Генеральный директор-Главный конструктор Харитон-Планта,

³Канд. техн. наук, доцент Национального аэрокосмического университета им. М. Е. Жуковского «ХАИ»

КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Сформулированы основные положения обеспечения живучести спутниковых систем ориентации и стабилизации, базирующиеся на принципе самоорганизации посредством глубокого диагностирования аварийного функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности объекта.

Ключевые слова: живучесть, диагностирование, нештатная ситуация, самоорганизация.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение круга функциональных задач, решаемых современными космическими аппаратами, и увеличе-

ние сроков их активного существования возможно путем обеспечения эффективного и качественного функционирования их бортовых систем как в номинальных

условиях работы, так и при возникновении разнообразных нештатных ситуаций. Обеспечить выполнение целевых функций космического аппарата при возникновении неопределенных нештатных ситуаций возможно путем обеспечения живучести бортовых систем спутника, к которым относится система управления ориентацией и стабилизацией спутника (СУОСС).

В научной литературе традиционно процесс обеспечения живучести СУОСС связывается с повышением надежности работы бортовых систем спутника (безотказностью). Такой подход оправдывает себя, если при рассмотрении СУОСС исключается из рассмотрения сам объект управления, а рассматриваются только информационно-преобразовательные элементы, что само по себе является некорректным, так как объект управления (спутник) представляет собой неотъемлемый элемент контура управления. Понятие живучести значительно шире понятия надежности, так как предусматривает работу СУОСС при наличии нештатных ситуаций, вызванных как внутренними, так и внешними аномальными явлениями. Кроме того, выдвигая предположение о неопределенности отказа и его характеристик, представляющее собой самую «жесткую» гипотезу среди известных, модели и методы, применяемые в теории надежности, становятся не применимы для обеспечения живучести СУОСС, что требует разработки концептуально нового подхода к обеспечению живучести СУОСС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из анализа проблемы обеспечения требуемого времени активного существования спутника на орбите следует, что предпочтительным вариантом для ее решения является подход, связанный с обеспечением живучести СУОСС. СУОСС, обладающие свойством живучести, – это класс адаптивных систем управления с развитыми функциями диагностирования и парирования нештатных ситуаций. Развитая функция диагностирования заключается в глубоком выявлении функциональных причинно-следственных связей возникновения нештатной ситуации с заданной глубиной, другими словами, в поиске устранимых причин отказа СУОСС. В свою очередь развитая функция парирования заключается в гибком управлении избыточными ресурсами, обеспечивающими предотвращение дальнейшего развития нештатной ситуации или такую компенсацию ее последствий, что восстанавливаются измененные или утраченные функциональные свойства системы.

Для решения задач диагностирования и парирования нештатных ситуаций на каждом этапе жизненного цикла СУОСС необходимо формировать множество избыточных ресурсов, обеспечивающих покрытие множества диагностируемых устранимых и неустранимых причин отказов, а также разработать гибкие процедуры диагностирования причин отказа и использования ресурсов для парирования причин отказов, вызвавших нештатную ситуацию.

РАЗРАБОТКА РАЗВИТОЙ ФУНКЦИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУОСС

Способность СУОСС со свойствами живучести самоорганизовываться в нештатных ситуациях базируется на получении достоверной информации о причинах, т. е. на диагнозе. Для получения адекватного диагноза нештатной ситуации требуется разработка «Комплекса взаимосвязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта» [1], другими словами, диагностического обеспечения. Разработка диагностического обеспечения базируется на формализованном представлении объекта диагностирования, отражающем связь причины нештатной ситуации с ее доступными наблюдениям и измерениям последствиями. Поэтому качество диагностического обеспечения существенно зависит от используемых диагностических моделей. Традиционно в практике разработки и эксплуатации спутниковых систем используют диагностические модели в графической и табличной формах, отражающих только качественную связь между причиной отказа и ее доступным измерению следствием [2–4]. Для количественного отражения причинно-следственных связей предложен новый класс диагностических моделей: диагностические функциональные модели (ДФМ) [5], позволившие формировать принципиально новое диагностическое обеспечение, обладающее следующими характерными особенностями.

Использование ДФМ, отражающих влияние признаков отказа на качество функционирования объекта диагностирования, позволяет описывать нештатные ситуации как в переходных, так и в установившихся режимах функционирования, т. е. в динамических, что позволяет получить существенно большие объемы качественной диагностической информации. ДФМ позволяют отразить изменения качества функционирования, в котором и оценивается техническое состояние объекта диагностирования и выполняемое им функциональное назначение. Применение ДФМ позволяет существенно увеличить глубину диагностирования до устранимой причины отказа с помощью более эффективных избыточных ресурсов. А именно, до конкретного физического вида отказа, что не позволяют сделать известные в теории и используемые на практике диагностические модели. Внедрение диагностического обеспечения на основе ДФМ позволяет найти и сформировать целесообразный с точки зрения современных подходов компромисс (баланс) между эффективностями диагностического и реабилитационного обеспечения спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией, что способствует существенному продлению сроков активного функционирования спутниковых систем.

Диагностическое обеспечение разрабатывается для трехуровневой иерархии (рис. 1). Первый нижний уровень – блоковый. Здесь формируется диагностическое обеспечение (ДО) для блоков датчиков (ДОБД), приводов (ДОБП), вычислителей (ДОБВ) не автономно, а исходя из условий их функционирования в замкнутом контуре.

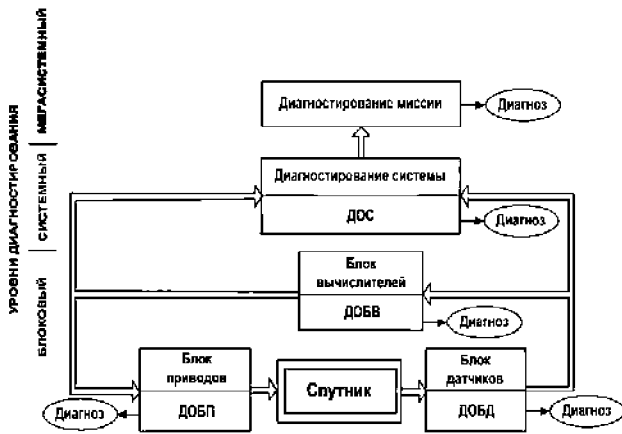


Рис. 1. Функциональная схема иерархического диагностического обеспечения

Второй уровень – системный. Диагностическое обеспечение разрабатывается для всей замкнутой системы управления ориентацией и стабилизацией. Диагностируется выполнение системой ее функций в условиях космического полета. Третий уровень иерархии – мегасистемный. На этом уровне формируется диагностическое обеспечение выполнения космической миссии в целом.

На каждом уровне иерархии при разработке ДО формируются свои специфические для этого уровня подмножества возможных нештатных ситуаций, исходя из целей и задач проекта, опыта разработки, производства и эксплуатации подобных проектов, качества используемых приборов и других факторов, влияющих на качество выполнения космической миссии.

Назначение ДО: оперативная оценка качества функционирования объектов диагностирования в реальном масштабе времени. Качество функционирования объектов диагностирования: блоков, системы в целом, спутника + наземный комплекс сопровождения и управления полетом – определяется требованиями технического задания. На каждом уровне иерархии задача ДО сформировать оперативный диагноз адекватный возникшей нештатной ситуации для последующего эффективного ее парирования с целью обеспечения выполнения поставленных задач каждого этапа жизненного цикла спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией.

Диагностическое обеспечение формируется с использованием трех типов диагностических функциональных моделей: ДФМ для обнаружения отказов, ДФМ для поиска места отказа, ДФМ для определения класса отказа. Эти диагностические модели разрабатываются для решения таких связанных задач диагностирования: обнаружения отказов, поиск места отказа, определение отказа. Последовательное решение таких задач позволяет реализовать принцип последовательного снятия неопределенности. Для каждой задачи формируются множество прямых признаков отказа и множество косвенных. Далее с использованием математических моделей номинального режима функционирования объекта диагностирования строятся математические конструкции,

отражающие связь прямых признаков отказа с косвенными в форме ДФМ. Для ДФМ принципиальным является отражение в полученной структуре имеющихся связей между признаками, а также возможность по доступным измерениям косвенным признакам оценить факт или величину косвенного признака. Для выявления таких свойств ДФМ используются специально разработанные критерии диагностируемости. Структурные свойства ДФМ оцениваются с помощью критериев структурной диагностируемости, а сигнальные свойства ДФМ – с помощью критериев сигнальной диагностируемости. Полная структурная и сигнальная диагностируемость ДФМ гарантирует возможность с помощью этих диагностических моделей получить однозначную информацию для формирования диагноза.

При разработке алгоритмических средств глубокого диагностирования применяются диагностические логические модели (ДЛМ), отражающие бинарную качественную связь между прямыми и косвенными диагностическими признаками объекта. ДЛМ строятся на основании ДФМ с использованием предикатных уравнений по определенным правилам. Применение ДЛМ позволяет ставить и решать задачи минимизации количества косвенных признаков по различным технико-экономическим критериям. Полученные в результате минимизации ДЛМ в табличной форме позволяют перейти к структурам предикатных баз знаний в форме дихотомических деревьев, в узлах которых находятся двужначные предикатные функции, полученные из соответствующих фрагменту дерева ДФМ. Такое дихотомическое дерево с предикатными функциями от дискретных значений косвенных признаков отказов в узлах представляет собой алгоритмическое обеспечение процесса получения полного диагноза функционального состояния объекта диагностирования. Укрупненно получение полного диагноза можно представить с помощью функциональной схемы, отражающей совокупность описанных средств диагностического обеспечения (рис. 2).

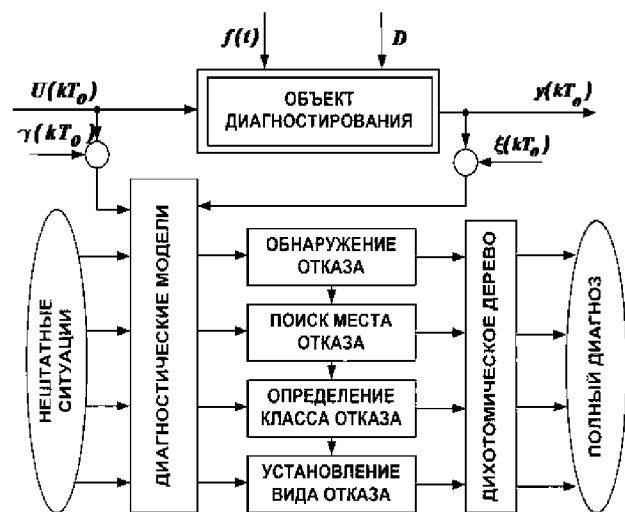


Рис. 2. Функциональная схема средств диагностического обеспечения

РАЗРАБОТКА РАЗВИТОЙ ФУНКЦИИ ПАРИРОВАНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ СУОСС

Адаптация СУОСС базируется как на получении полного диагноза о функциональном состоянии, вызвавшем нештатную ситуацию, так и на гибком использовании избыточных ресурсов, позволяющих нейтрализовать последствия выявленного вида отказа. Таким образом, для качественного парирования нештатных ситуаций требуется: полный диагноз функционального состояния объекта диагностирования (блока, системы, миссии), отражающий время появления отказа, его места, класса отказа и конкретный физический вид его проявления; наличие избыточных ресурсов, покрывающих множество устранимых видов отказов; процедуры выбора избыточного ресурса, учитывающие предыдущие нештатные ситуации, исходя из текущей ситуации и задач миссии; процедуры эффективного восстановления работоспособности отказавшего объекта диагностирования; средство диагностирования восстановленного объекта диагностирования.

Перспективным подходом к парированию нештатных ситуаций представляется подход с использованием принципа адаптации к особенностям СУОСС, возможным нештатным ситуациям и задачам космической миссии. Особенности такого подхода заключаются в следующем. Парирование нештатных ситуаций производится после обстоятельного, глубокого и качественного диагностирования функционального состояния объектов диагностирования. Другими словами, требуется диагностировать качество выполнения объектом его функционального назначения в режиме выполнения функциональных задач по ориентации и стабилизации спутников. Тестовые режимы диагностирования наиболее распространены в практике диагностирования. В тестовых режимах входные воздействия на объект – это заранее сформированные воздействия, не в полной мере отражающие как характер, так и диагнозы рабочих воздействий. Это обстоятельство приводит к тому, что результаты диагностирования в тестовом режиме, т. е. диагноз, в большей степени отражает способность объекта преобразовывать тестовое воздействие, а не его способность функционировать в замкнутом контуре по выполнению задачи ориентации и стабилизации спутника. Тестовые режимы не позволяют в полной мере учесть влияние связей между блоками, возмущающих воздействий как на связи, так и на блоки, отказы других блоков и подсистем и многое другое, не попадающее в сферу тестового диагностирования и приводящее к частичному, неполному диагнозу.

Вторым необходимым атрибутом качественного парирования нештатных ситуаций в спутниковых системах ориентации и стабилизации является наличие средств восстановления работоспособности. Парирование осуществляется посредством выбора избыточных средств, в наибольшей степени соответствующих сложившейся ситуации в космической миссии, а затем посредством процедур восстановления работоспособности отказав-

шего объекта. Окончательная (завершающая) стадия парирования осуществляется посредством восстановления работоспособности блоков на блоковом уровне, системы в целом на системном уровне, всей миссии на мегами системном уровне. Средства восстановления работоспособности – это различные виды избыточности: функциональной, временной, сигнальной, параметрической, алгоритмической, аппаратной и ряд других. Формирование обоснованного множества избыточных средств – это новая научно-техническая задача. При постановке этой задачи нужно установить связи (установить баланс) между глубиной диагностирования – до устранимого (парлируемого) вида отказа – и избыточными ресурсами парирования. Между множеством парлируемых видов отказов V и множеством ресурсов парирования R в результате такого исследования должно быть установлено соответствие

$$P: V \rightarrow R. \quad (1)$$

Парирование любого вида отказа из множества возможных – это не тривиальная процедура замены отказавшего фрагмента исправным, а достаточно сложное динамическое восстановление углового положения спутника относительно его центра масс в соответствии с полетным заданием. Каждый вид отказа необходимо рассматривать как специфическое возмущающее воздействие на спутниковую систему ориентации и стабилизации, приводящее к нарушению как требуемых режимов углового состояния спутника, так и технического состояния его системы управления угловым положением. В связи с этим обстоятельством парирование нештатной ситуации, вызванное выявленным в процессе диагностирования конкретным видом отказа, должно производиться в следующей последовательности: вначале выбирается средство для реабилитации ухудшенного технического состояния отказавшего фрагмента, затем с помощью выбранного средства производится восстановление технического состояния, а следовательно, и работоспособности аварийного фрагмента системы. После восстановления работоспособности требуется с помощью соответствующих процедур подстройки восстановить функциональное состояние системы управления до требуемых в данный момент времени характеристик и показателей. Таким образом, ресурсы парирования каждой конкретной нештатной ситуации, вызванной соответствующим конкретным видом отказа, включает: средства реабилитации технического состояния места отказа; процедуры реабилитации; средства компенсации возмущенного углового движения спутника, вызванное видом отказа; процедуры восстановления требуемого, соответствующего полетному заданию функционального состояния спутниковой системы управления угловым положением.

Блоковый уровень включает: блок датчиков, блок приводов и блок вычислителей. На рис. 3 представлена структуризация проблемы гибкого парирования видов отказов в аварийных блоках. Исходным для разрешения про-

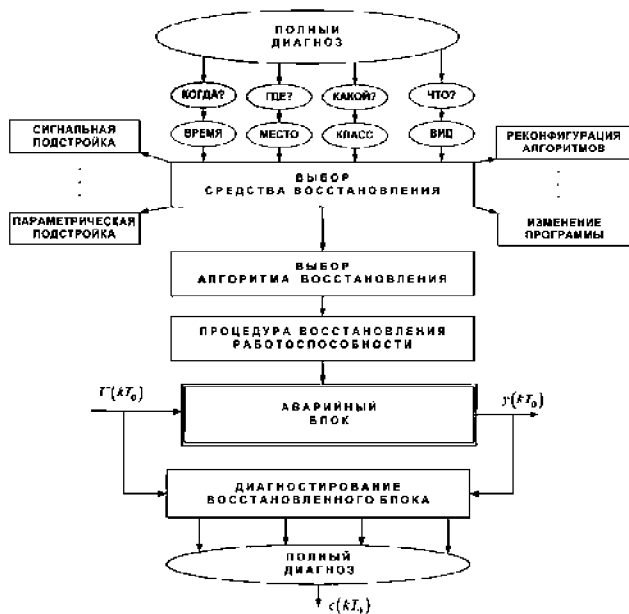


Рис. 3. Структуризация проблемы гибкого парирования видов отказов

блемы есть результат диагностирования функционального состояния блока – полный диагноз. На основании этой информации ставится задача формирования множества ресурсов R парирования множества V – видов отказов конкретного блока. В зависимости от конструкции блока, принципа его действия, множества V подбираются избыточные ресурсы – средства восстановления от различных возможных подстроек до приемлемых средств реконфигурации. Выбор средств восстановления производится на основании предыстории функционирования системы управления, текущего вида отказа, оставшихся избыточных ресурсов и предстоящих задач космической миссии. Выбранное средство восстановления нужно ввести в действие и для этого требуется определенная последовательность действий – алгоритм, который выбирается из множества возможных для текущей ситуации. Затем алгоритм восстановления вводится в действие с помощью соответствующей процедуры, обеспечивающей восстановление работоспособности аварийного блока в пределах (условиях) допустимых полетным заданиям.

После восстановления аварийного блока производится диагностирование его функционального состояния. При этом возможны два исхода. Первый – восстановлена полностью работоспособность блока и его можно использовать в системе управления по назначению. Второй – работоспособность блока не восстановлена и выявлен другой вид отказа, поэтому для парирования этого вида отказа требуется повторить описанный ранее цикл до полного восстановления функциональных свойств аварийного блока. После полного восстановления аварийного блока передается сигнал $c(kT_0)$ на системный уровень, на котором производится парирование системных последствий отказов в блоках с целью последующего выполнения полетного задания.

Отказы в блоках приводят к тому, что спутниковая система управления ориентацией и стабилизацией отклоняется от выполнения своих штатных функций, приводящих к существенному изменению углового положения спутника относительно центра масс по сравнению с заданным программным. Поэтому после выполнения процедур гибкого парирования видов отказов в аварийных блоках системы по сигналам $c(kT_0)$ требуется восстановить программное угловое положение спутника. Причиной нештатных ситуаций на системном уровне являются отказы в межблоковых линиях связи, а также отказы в самой конструкции спутника и существенные внешние возмущающие воздействия. На рис. 4 представлена функциональная схема средств гибкого парирования нештатных ситуаций на системном уровне.

Глубокое диагностирование качества функционирования замкнутой спутниковой системы управления позволяет получить информацию о времени появления отказа, его месте, классе и конкретном физическом проявлении. Анализ возможных системных нештатных ситуаций позволяет сформировать множество видов отказов V системного уровня. Множество избыточных ресурсов для этого уровня R формируется, исходя из необходимости парировать последствия видов отказов множества V . Выбор средств восстановления работоспособности спутниковой системы управления должен производиться с учетом предыдущих системных нештатных ситуаций, оставшихся избыточных ресурсов парирования и предстоящих задач космической миссии.

Выбор средств восстановления работоспособности влечет за собой необходимость выбора алгоритмических средств, т.е. структуры и параметров формализованного действия по парированию текущей нештатной ситуации. После восстановления работоспособности сис-

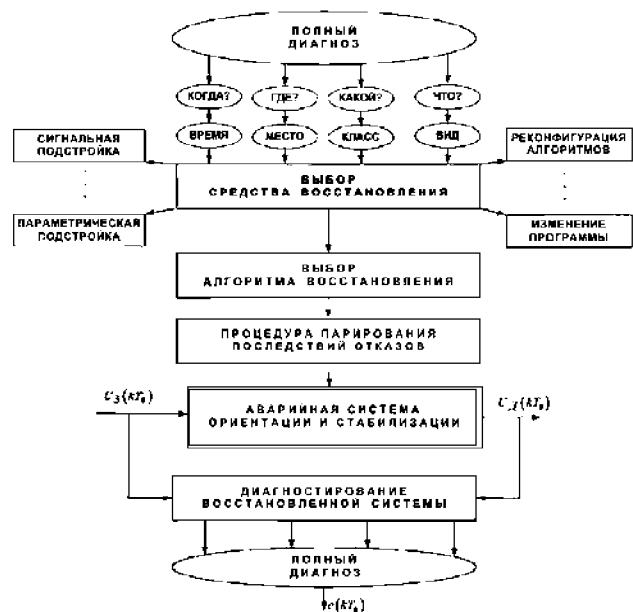


Рис. 4. Функциональная схема средств гибкого парирования системных нештатных ситуаций

темы управления и парирования последствий отказов требуется удостовериться в функциональных свойствах восстановленной системы и качестве выполнения полетного задания. С этой целью производится диагностирование восстановленной спутниковой системы управления ориентацией и стабилизацией. Полный диагноз $c(kT_0)$ позволит принимать решение или о продолжении парирования последствий отказов или о дальнейшем выполнении миссии или о необходимости парирования на мегасистемном уровне.

Отказы на блоковом и системном уровне могут породить такие нештатные ситуации, которые не смогут быть парированы на этих уровнях из-за недостатка избыточных ресурсов, алгоритмических и программных средств, позволяющих парировать возникшую ситуацию и ряда других причин. Мегасистемный уровень парирования нештатных ситуаций – это третий заключительный уровень, на котором обеспечивается выполнения космической миссии в целом. В данном исследовании рассматриваются лишь задачи обеспечения парирования нештатных ситуаций только одной компоненты сложного комплекса, обеспечивающего выполнение космической миссии, а именно, спутниковой системы управления ориентацией и стабилизацией, а не всего комплекса. На рис. 5 представлена совокупность средств, требуемых для парирования нештатных ситуаций на уровне выполнения космической миссии.

После выбора стратегии осуществляется выбор средств ее реализации, исходя из обобщенных критериев всей космической миссии. Использование выбранных средств производится с помощью соответствующей процедуры реализации стратегии через наземный комплекс управления и центр управления полетом по измененному полетному заданию спутника. После оконча-

ния цикла парирования нештатной ситуации в космической миссии производится ее диагностирование с целью оценки текущего состояния посредством полного диагноза. Полный диагноз представляет объективную и обстоятельную информацию о качестве функционирования спутниковой системы управления ориентацией и стабилизацией, необходимую для принятия обоснованного решения о перспективах космической миссии.

Общим, как следует из предыдущего изложения, для каждого уровня парирования является необходимость диагностирования с глубиной до парируемого вида отказа, а также восстановления работоспособности отказавшего объекта. Вместе с тем, появление видов отказов в блоках и системе в целом приводит к накоплению угловых отклонений от полетного задания. Величины этих угловых отклонений существенно зависят не только от периода диагностирования, но и от длительности процедур по восстановлению работоспособности. Накопленные отклонения не позволяют продолжить качественно выполнять полетное задание. Это возмущающие воздействия, дестабилизирующие функционирование спутниковой системы ориентации и стабилизации. Поэтому после процедуры восстановления работоспособности требуется процедура компенсации накопившихся угловых отклонений.

Как следует из приведенных исследований, весь период парирования нештатной ситуации, вызванной каким-либо видом отказа, будет определяться таким выражением

$$T_{\Pi} = \tau_d + \tau_b + \tau_k. \quad (2)$$

Нештатная ситуация – это дестабилизирующее событие для космической миссии, поэтому чем меньше T_{Π} , тем меньше отрицательное влияние такого события на эффективность всего проекта. Вместе с тем, существуют технико-экономические ограничения для каждого проекта, обуславливающие интервальное ограничение для T_{Π} :

$$T_{\min} \leq T_{\Pi} \leq T_{\max}, \quad (3)$$

где $T_{\min}$ – минимально возможный период парирования, а $T_{\max}$ – максимально возможный период парирования нештатных ситуаций. Очевидно, для того, чтобы вложиться в установленные ограничения для T_{Π} требуется найти рациональное разложение на составляющие τ_d , τ_b , τ_k с учетом их интервального характера. Такое разложение целесообразно свести к оптимизационной задаче.

Итак, предлагаемый подход к разработке реабилитационного обеспечения спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией требует значительных усилий по комплексной формализации процедур восстановления работоспособности блоков, связей и систем, связывающей известные фрагменты аналитического реше-

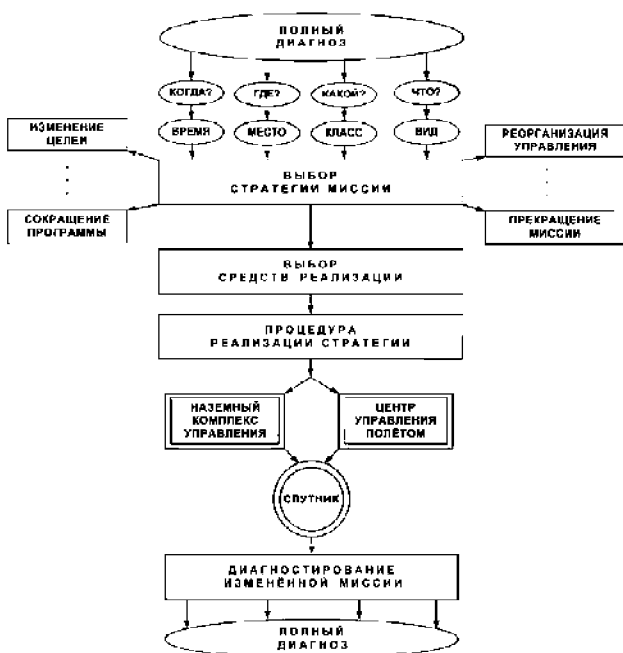


Рис. 5. Функциональная схема средств гибкого парирования отказов миссии

ния отдельных задач в совокупность моделей, методов и средств проектирования. Описанный подход позволяет формализовать разработку реабилитационного обеспечения на платформе гибкого управления избыточными ресурсами.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты исследования внедряются в практику создания и эксплуатации живучих спутниковых СУОС на предприятиях, занимающихся разработкой подобных систем, к числу которых относится корпорация «ХАРТРОН». Примерами, демонстрирующими эффективность рассмотренного подхода, являются эксплуатируемые сегодня системы, наделенные свойством живучести на элементном уровне и вновь создаваемые, реализующие системные и мегасистемные уровни живучести космических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметов, Р. Н.* Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Р. Н. Ахметов. – Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С. П. Королева. – 2008. – №2. – С. 194–210.
2. Космические летательные аппараты. Введение в ракетно-космическую технику: Учеб.пособ. // Ю. Ф. Даниев, А. В. Демченко, В. С. Зевако, А. М. Кулабухов, В. В. Хуторный; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. Н. Петренко. – Днепропетровск, 2007. – 521 с.
3. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. А. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов; под ред. Е. А. Микрина. Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова РАН. – М. : Наука, 2006. – 579 с.
4. Бортвые системы управления космическими аппаратами: Учебные пособия / Бровкин А. Г., Бурдычев Б. Г., Гордийко С. В. и др. Под ред. А. С. Сырова. – М. : Изд-во МАИ- ПРИНТ, 2010. – 340 с.
5. *Лученко О. А.* Определение параметров установки двигателей-маховиков системы ориентации и стабилизации несимметричного малогабаритного космического аппарата / О. А. Лученко, А. Н. Таран, С. Н. Фирсов, В. Н. Постников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №1 (78). – С. 63–68.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2011.

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

КОНЦЕПЦІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧІСТЮ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ОРІЄНТАЦІЄЮ ТА СТАБІЛІЗАЦІЄЮ

Сформульовано основні положення забезпечення живучості супутникових систем орієнтації і стабілізації, що базуються на принципі самоорганізації за допомогою глибокого діагностування аварійного функціонального стану і гнучкого відновлення працездатності об'єкта.

Ключові слова: живучість, діагностування, нештатна ситуація, самоорганізація

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

THE CONCEPT OF SURVIVABILITY OF SATELLITE SYSTEMS, ATTITUDE CONTROL AND STABILIZATION

The fundamentals of position control and stabilization satellite system survivability assurance based on the principle of self-organization through deep diagnosis accident functional conditions and flexible restorative function are presented.

Key words: survivability, diagnosis, worst-case situation, self-organization.