

УДК 681.5.015:629.7.05

С.Н. ФИРСОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ**

Сформулированы основные положения методологии обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации, базирующиеся на принципе самоорганизации посредством глубокого диагностирования аварийного функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности объекта. Введено понятие и предложено математическое описание динамического объекта диагностирования и восстановления работоспособности. Представлен класс диагностических функциональных моделей и класс логических функциональных моделей. Изложены модели и средства восстановления работоспособности динамического объекта с помощью модифицированных диагностических моделей и с использованием второго метода А.М.Ляпунова.

Ключевые слова: функциональная устойчивость, диагностирование, нештатная ситуация, самоорганизация, восстановление.

Введение

Освоение космического пространства сегодня обуславливает повышение требований к спектру возможностей спутников различного назначения и к эффективности их использования в космических миссиях [1]. Дестабилизирующим фактором выполнения современных и перспективных требований при создании и эксплуатации спутниковых систем являются разнообразие нештатные ситуации.

Мажоритарный принцип парирования нештатных ситуаций в условиях бортовых ограничений запасов энергии, массы, габаритов, с одной стороны, и повышения качества функционирования, с другой стороны, не позволяет в большинстве проектов для таких противоречивых требований находить эффективные компромиссные технические решения.

Поиски новых подходов к парированию нештатных ситуаций в настоящее время сосредоточились в основном в направлении дальнейшего совершенствования и расширения принципа управления по отклонению на нештатные ситуации. Такое развитие исследований привело к появлению нового класса систем, обладающих функциональной устойчивостью при появлении нештатных ситуаций, базирующейся на принципах диагностирования и восстановления функционального состояния объектов [2].

Постановка задачи исследования

Теоретические исследования по проблематике функциональной устойчивости развиваются в направлении фрагментарного решения отдельных аспектов парирования нештатных ситуаций в полете.

Так, наблюдается значительный прогресс в исследовании моделей и методов диагностирования. Однако использования большинства полученных теоретических результатов для диагностирования в полете систем ориентации и стабилизации не дает желаемого эффекта. Аналогичное положение с известными результатами по парированию нештатных ситуаций. Таким образом, практически целесообразной, относительно новой в научном плане, вытекающей из тенденций развития практики и теории, представляется цель, состоящая в разработке моделей и методов обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации при возникновении нештатных ситуаций.

Для достижения такой цели необходимо сформировать методологию обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации (ССО), базирующихся на понятии обобщенного динамического объекта и его моделях, отражающих процессы развития нештатных ситуаций и парирования их последствий [3, 4].

Концепция обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем ориентацией и стабилизацией

Современные и перспективные требования к локализации нештатных ситуаций спутников 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. 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. Ожидаемые эффекты от такого подхода – это существенное снижение массы и габаритов избыточного приборного оборудования, а, следовательно, уменьшение бортового энергопотребления и, в конечном счете, повышение эффективности всей спутниковой программы в целом.

Парирование нештатных ситуаций посредством гибкого управления программно-аппаратными избыточными средствами базируется на следующих принципиальных положениях:

1. Множество видов отказов – это, по сути, множество парируемых причин нештатных ситуаций. Парируемость причин, другими словами, возможность локализовать нештатную ситуацию, т.е. восстановить работоспособность спутниковой системы зависит от мощности функциональных возможностей множества имеющихся в распоряжении избыточных средств. Так как избыточным средством какого-то типа можно парировать несколько причин нештатных ситуаций, то между множеством видов отказов и множеством избыточных средств нет взаимно-однозначного соответствия. При формировании множества избыточных средств нужно учитывать ряд порой противоречивых требований, вытекающих из технического задания, поэтому задача формирования этого множества должна быть сведена к многокритериальной задаче, что позволит сформировать сбалансированное количество типов избыточных средств спутника.

2. Из-за меньшей мощности множества средств восстановления возникает необходимость целевого выбора определенного средства восстановления для парирования текущего вида отказа. При этом в стратегию выбора нужно заложить принцип «бережного расходования средств», означающий, что вначале выбираются средства с меньшим покрытием видов отказов, а затем, в дальнейшем, с большим. Такая стратегия позволит существенно повысить время активного функционирования спутниковой системы, её ресурс.

3. Появившийся в спутниковой системе отказ приводит к уходу системы по статической характеристике от заданной, требуемой рабочей точки независимо от режима ориентации или стабилизации. Для возврата системы в заданную рабочую точку нужно сформировать такое управляющее воздействие, чтобы обеспечить устойчивость функционирования замкнутого контура ориентации и стабилизации, а также требуемое качество переходного процесса из возмущенного отказом состояния в восстановленное,

близкое к номинальному или номинальное. Для осуществления такого управления требуется не только информация о конкретном физическом виде отказа, вызвавшего нештатную ситуацию, а также нужна информация об угловых отклонениях и скоростях угловых отклонений в текущий момент времени, о запасах рабочего тела или электрической энергии и его допустимых расходах на коррекцию углового положения спутника, о необходимых и допустимых временных ресурсах на коррекцию и ряд других исходных данных, обусловленных функциональным назначением спутника. Эти данные нужны для расчёта в реальном масштабе времени структуры и параметров алгоритма управления, введением соответствующей ситуации избыточного ресурса для восстановления работоспособности спутниковой системы ориентации и стабилизации.

Самоорганизация в спутниковых системах ориентации и стабилизации с целью обеспечения их активной устойчивости ко всем видам отказов, вызывающих нарушения функциональных преобразовательных свойств приборного оборудования и самого спутника, осуществляется с помощью принципа трёхуровневой иерархии. Первый уровень иерархии – блоковый. На этом уровне формируются (разрабатываются, проектируются) приборы в конструктивно-законченные блоки, выполняющие целевые функциональные преобразования для системы ориентации и стабилизации, исходя из базового принципа управления – по отклонению. Итак, для измерения углового положения и угловых скоростей спутника относительно центра масс в зависимости от решаемых задач используются различные по принципу действия, конструктивным решениям и функциональным возможностям, инерциальные датчики. Для комплексного решения навигационной задачи спутника используют инерциальные навигационные системы, в состав которых входят датчики углового положения и угловой скорости. Системы инерциальной навигации обеспечивают измерение текущих значений угловой скорости движения и линейного ускорения, вычисление угловой ориентации относительно начальной стартовой системы координат, скорости движения и текущих координат в инерциальной системе координат. Инерциальные навигационные системы могут строиться как с размещением гироскопов и акселерометров на гиристабилизированной платформе, физически реализующей начальную стартовую систему координат, так и с жёстким размещением гироскопов и акселерометров на спутнике в бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС), в которой базовая система координат строится алгоритмически [1 – 3]. Принципиальное преимущество инерциальной навигационной системы по сравнению с другими за-

ключается в возможности автономно, без внешней информации определять кинематические параметры траектории и характеристики углового движения спутника. Оснащение инерциальной навигационной системы аппаратно-программными средствами диагностирования и парирования нештатных ситуаций приводит к *отказоустойчивому блоку датчиков* (ОБД). Этот блок в большинстве нештатных ситуаций, вызванных нарушениями в функционировании датчиков и приводящих к искажению результатов измерений должен обладать способностью самодиагностирования до устранимого вида отказа и самопарирования этих изменений, другими словами самовосстановления измерений до приемлемых точностей. Обладая такими свойствами блок «не будет выносить сор из избы», т.е. последствия нештатной ситуации, возникшей в таком блоке, не будут распространяться на другие компоненты замкнутого контура системы ССОС, изменяя режимы их функционирования и вызывая цепную реакцию нештатных ситуаций, возможность диагностирования которых, в реальном масштабе времени с глубиной до устранимого вида отказа, принципиально ограничена, а, следовательно, существенно уменьшаются возможности их парирования.

Для создания управляющих моментов на спутник используются пассивные, активные и комбинированные способы, базирующиеся на различных типах исполнительных органов. При пассивных способах стабилизация и ориентация спутника осуществляется с помощью внешних моментов, создаваемых внешней средой и гироскопических моментов, возникающих при раскрутке спутника вокруг одной из связанных осей. В активных способах ориентации и стабилизации используются исполнительные органы, потребляющие энергию в том или ином виде от бортовых источников и функционирующие по принципу управления по отклонению, что приводит к замкнутым системам управления с отрицательной обратной связью. При комбинированном способе используются элементы пассивных и активных систем создания управляющих моментов.

При проектировании функциональных элементов системы стабилизации и ориентации спутника формируются такие конструктивно-законченные блоки приводов, в которых применяются избыточные элементы, а также аппаратно-программные средства диагностирования и парирования возможных ситуаций. Такой блок, обладающий новыми свойствами, назовем *отказоустойчивый блок приводов* (ОБП). Нештатные ситуации, возникающие в таком блоке, диагностируются и парируются в реальном масштабе времени, что не сказывается на функциональных свойствах элемента и на качество функционирования всей замкнутой системы стабилизации и ориентации.

Третьей функционально-законченной компонентной замкнутой системы стабилизации и ориентации представляется бортовой цифровой вычислительный комплекс, состоящий из бортовых цифровых вычислительных машин, устройств ввода - вывода, управления конфигурацией комплекса, модуля команд, коммутации и распределения питания, бортовой кабельной сети. Оснащение вычислительного комплекса развитыми аппаратно-программными средствами диагностирования и парирования нештатных ситуаций позволит обезопасить всю систему ориентации и стабилизации от локальных аномалий. Блок, обладающий такими свойствами, для удобства последующего изложения назовём *отказоустойчивым блоком вычислителей* (ОБВ).

Для подавления влияния видов отказов спутника и межблочных связей формируется второй уровень иерархии самоорганизации - *системный*. На этом уровне производится диагностирование функционального состояния всей замкнутой спутниковой системы ориентации и стабилизации, в результате чего, при появлении нештатной ситуации, находится место её возникновения, устанавливается класс отказа и определяется его конкретный вид, т.е. получается полный диагноз нештатной ситуации, вызвавшей ухудшение качества функционирования спутниковой системы, другими словами, невыполнение возложенных на спутник задач. После получения диагноза включается процедура парирования нештатной ситуации посредством имеющихся на борту избыточных ресурсов с целью восстановления работоспособности спутниковой системы ориентации и стабилизации.

Третий уровень самоорганизации - *мегасистемный*. На этом уровне осуществляется диагностирование всей космической миссии, т.е. проекта в целом, при появлении нештатной ситуации, которую не удалось диагностировать и парировать на нижних уровнях: блоковом и системном. При этом локализуется та часть миссии, где возникла нештатная ситуация, по доступной информации классифицируется отказ и определяется его причина - вид. На основании этого диагноза и имеющихся ресурсных возможностей на борту спутника и в ближайшей космической окрестности, а также в центре управления полетом и с учетом многих факторов политического, военного, экономического, стратегического характера принимается решение по парированию этой мегасистемной нештатной ситуации.

Новый класс спутниковых систем стабилизации и ориентации, обладающих способностью в реальном масштабе времени при возникновении нештатных ситуаций «снять» неопределённость по моменту возникновения отказа, его месту появления, классу отказа и конкретному его виду, а затем принять решение, исходя из имеющихся ресурсных возможностей, по пари-

рованию последствий с целью восстановления работоспособности до приемлемых запасов устойчивости и показателей качества, т.е. это класс самоорганизующихся функционально устойчивых систем для всех. Внедрение этого класса спутниковых систем в практику проектирования всего жизненного цикла по предварительным оценкам экспертов позволит существенно повысить эффективность космических миссий в целом и создать более комфортные условия для работы на всех этапах жизненного цикла космических изделий.

Особенности диагностического обеспечения

Способность спутниковых систем стабилизации и ориентации самоорганизовываться в нештатных ситуациях посредством обеспечения их свойством функциональной устойчивости базируется на получении достоверной информации о причинах, т.е. на диагнозе. Для получения адекватного нештатной ситуации диагноза требуется разработка «Комплекса взаимосвязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта» [5], другими словами, диагностического обеспечения. Разработка диагностического обеспечения базируется на формализованном представлении объекта диагностирования, отражающем связь причины нештатной ситуации с её доступными наблюдениям и измерениям последствиями. Поэтому качество диагностического обеспечения зависит существенно 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 её доступным измерению следствием [5]. Для количественного отражения причинно-следственных связей предложен новый класс диагностических моделей: диагностические функциональные модели (ДФМ) [6], позволившие формировать принципиально новое диагностическое обеспечение, обладающее рядом особенностей.

1. 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 дает возможность получить существенно большие объёмы качественной диагностической информации.

2. Диагностическое обеспечение на всех этапах жизненного цикла формируется и используется для всей системы управления в целом, а не для отдельных блоков и подсистем. Такой подход способствует более полному – системному учёту возможных

нештатных ситуаций, так как базируется на принципе влияния видов отказов на функционирование всей системы в целом.

3. В практике проектирования разработчик каждого прибора спутниковых систем стабилизации и ориентации стремится увеличить количество контрольных точек телеметрии, чтобы, во-первых, получить избыточную, более полную информацию о функционировании прибора, а во-вторых, «обезопасить» свою фирму при нештатной ситуации.

4. Формализация процесса разработки диагностического обеспечения на едином подходе – методологическом.

5. Диагностическое обеспечение разрабатывается для трёхуровневой иерархии (рис.1).

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

Второй уровень – системный. Диагностическое обеспечение разрабатывается для всей замкнутой системы управления ориентацией и стабилизацией. Диагностируется выполнение системой её функций в условиях космического полёта. 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.

6. Диагностическое обеспечение формируется с использованием четырех типов ДФМ: 1) ДФМ для обнаружения отказов; 2) ДФМ для поиска места отказа; 3) ДФМ для определения класса отказа; 4) ДФМ для установления вида отказа. Эти диагностические модели разрабатываются для решения таких связанных задач диагностирования: 1) обнаружения отказов; 2) поиск места отказа; 3) определение отказа; 4) установление вида отказа.

7. При разработке алгоритмических средств глубокого диагностирования применяются диагностические логические модели (ДЛМ), отражающие бинарную качественную связь между прямыми и косвенными диагностическими признаками объекта диагностирования (рис. 1).

Предлагаемый подход к разработке диагностического обеспечения спутниковых систем управления стабилизацией и ориентацией в значительной степени формализован, так как базируется на анали-

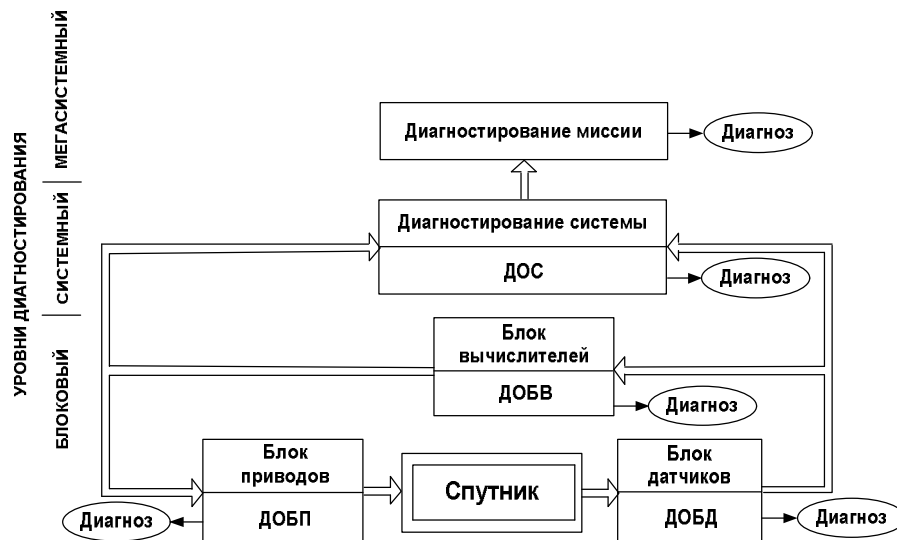


Рис. 1. Функциональная схема иерархического диагностического обеспечения

тических диагностических моделях. Это позволяет создавать на фирмах-разработчиках адаптированные к своей культуре проектирования программные средства автоматизации процесса формирования диагностического обеспечения. Такие программные средства, во-первых, дополняют существующие комплексы автоматизированного проектирования, что будет способствовать сокращению ресурсов на выполнение проектов, во-вторых, будут регламентировать процесс формирования диагностического обеспечения, позволяющего достичь новый уровень в глубине и качестве диагноза. В третьих, будут базовой основой для разработки средств автоматизации реабилитационного обеспечения спутниковых систем управления ориентации и стабилизации в нештатных ситуациях.

Особенности парирования отказов

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

стирования; д) средство диагностирования восстановленного объекта диагностирования.

В известных технических решениях [6], а также в теоретических разработках используются, в основном, простой принцип соответствия, реализующийся с помощью правила «если-то». Реализация этого принципа приводит к жёстким схемам использования избыточных ресурсов и энергозатратным процедурам восстановления работоспособности отказавших объектов диагностирования. Перспективным подходом к парированию нештатных ситуаций представляется подход с использованием принципа адаптации к особенностям спутниковых систем управления, возможным нештатным ситуациям и задачам космической миссии. Особенности такого подхода заключаются в следующем.

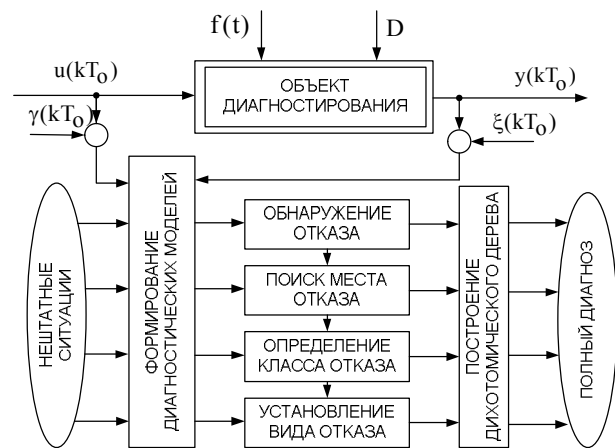


Рис. 2. Функциональная схема задач диагностического обеспечения

1. Парирование нештатных ситуаций производится после обстоятельного, глубокого и качественного диагностирования не только, даже не сколько, технического состояния объектов диагностирования, а его

функціонального состояния.

2. Вторым необходимым атрибутом качественно-парирования нештатных ситуаций в ССО есть наличие средств восстановления работоспособности.

3. Парирование любого вида отказа из множества заданных (возможных, сформированных, предполагаемых) – это не тривиальная процедура замены отказавшего фрагмента исправным - коммутации, а достаточно сложное динамическое восстановление углового положения спутника относительно его центра масс в соответствии с полетным заданием.

4. Исходным для разрешения задач парирования нештатной ситуации на блоковом уровне есть результат диагностирования функционального состояния блока - полный диагноз. Полный диагноз включает информацию о времени появления отказа, где он произошёл: его место, к какому классу принадлежит отказ и вид его конкретного физического проявления. На основании этой информации ставится задача формирования множества ресурсов парирования, множества видов отказов конкретного блока. В зависимости от конструкции блока, принципа его действия, множества видов отказов подбираются избыточные ресурсы – средства восстановления от различных, возможных подстроек до приемлемых средств реконфигурации.

5. Отказы в блоках приводят к тому, что ССО 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 требуется восстановить программное угловое положение спутника.

6. Отказы на блоковом и системном уровне могут породить такие нештатные ситуации, которые невозможно парировать на этих уровнях из-за недостатка избыточных ресурсов, алгоритмических и программных средств, позволяющих парировать возникшую ситуацию и ряд других причин. Мегасистемный уровень парирования нештатных ситуаций – это третий заключительный уровень, на котором обеспечивается выполнение космической миссии в целом.

7. Общим для каждого уровня парирования является необходимость диагностирования с глубиной до парируемого вида отказа, а также восстановления работоспособности отказавшего объекта.

Итак, парирование нештатных ситуаций в ССО состоит из таких этапов:

- 1) диагностирования с глубиной до устранимого вида отказа;
- 2) восстановление работоспособности отказавшего объекта (блока, связи, системы);
- 3) компенсация, накопившихся до окончания восстановительных процедур, угловых отклонений

от полётного задания.

Нештатная ситуация – это дестабилизирующее событие для космической миссии, поэтому, чем меньше время парирования, 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} :

$$T_{\Pi_{min}} \leq T_{\Pi} \leq T_{\Pi_{max}},$$

где $T_{\Pi_{min}}$ – минимально возможный период парирования, а $T_{\Pi_{max}}$ – 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 учётом их интервального характера. Такое разложение сводится к оптимизационной задаче.

Алгоритмическое обеспечение функциональной устойчивости

Разработка алгоритмического обеспечения функциональной устойчивости базируется на совокупности моделей, отражающих информационные аспекты преобразовательных свойств компонент и связей ССО. Ключевыми математическими моделями, позволяющими формировать процесс разработки, являются диагностические модели, отражающие связь между причиной отказа и её последствиями. Результаты диагностирования позволяют формировать и решать задачи по восстановлению работоспособности аварийного динамического объекта, с помощью соответствующих диагностических моделей.

Динамический объект – как объект диагностирования и восстановления. Рассмотрим обобщенную блок-схему спутниковой системы ориентации и стабилизации (рис. 3). В этой схеме отражены четыре основных функциональных подсистемы, с помощью которых реализуется принцип управления по отклонению для осуществления ориентации и стабилизации спутника. Схема отражает только информационно-преобразовательные свойства спутниковой системы.

С целью обеспечения требуемых показателей надёжности и периода активного существования спутниковые системы 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 математическим выражениям, трудно обозримым и сложно преобразуемым. 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:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + f(t); \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t); \quad x(t_0) = x_0, \end{aligned}$$

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

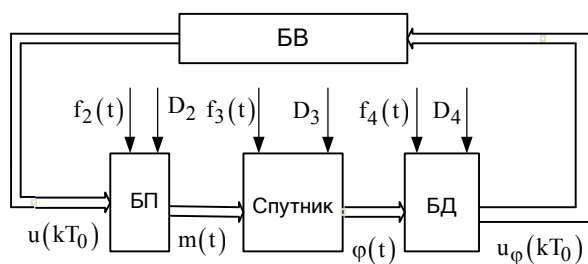


Рис. 3. Схема ССО

Используя известные методы перехода от непрерывных математических моделей к дискретным, можно представить преобразовательные особенности в номинальном режиме функционирования подсистем спутниковой системы ориентации и стабилизации и всей системы в целом как преобразовательные особенности обобщенного динамического объекта в форме конечно-разностных уравнений вида:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k); \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k); \quad x(k_0) = x_0, \end{aligned}$$

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

Чтобы отразить место и роль диагностических моделей, представим обобщенную функциональную схему, предлагаемую для разработки функциональ-

но устойчивого динамического объекта, с развитыми функциями глубокого диагностирования функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности (рис.4).

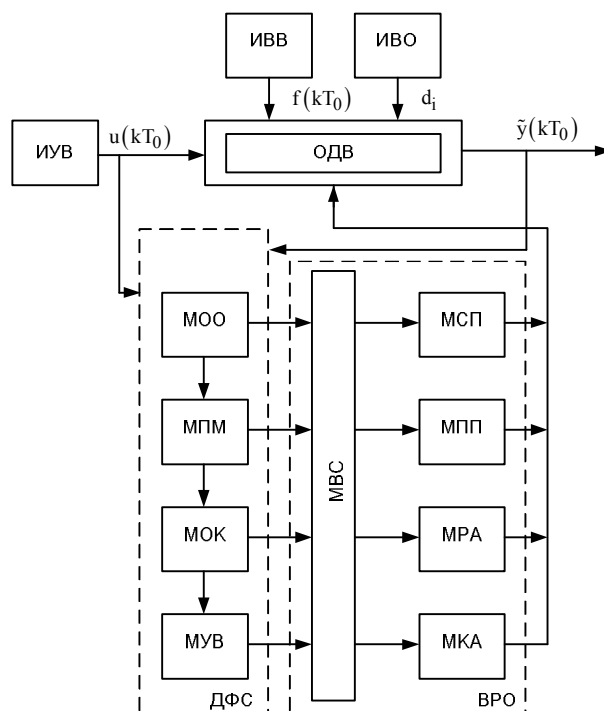


Рис.4. Обобщенная функциональная схема проектирования функционально устойчивого динамического объекта

Принцип действия обобщенной функциональной схемы заключается в следующем. На объект диагностирования и восстановления (ОДВ) 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 ОДВ отражается в доступном измерении 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 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).

Диагностические модели. На всех этапах проектирования спутниковых систем стабилизации и ориентации 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 [7]. Представим возмущенное движение динамического объекта в канонической наблюдаемой форме [8] с помощью следующей машинной системы уравнений:

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

где $\tilde{x}(k)$ – ν_1 -мерный вектор состояния аварийного динамического объекта, $\tilde{x}(k) \in X^{\nu_1}$; $u(k)$ – ν_2 -мерный вектор управляющих воздействий, $u(k) \in U^{\nu_2}$; $y(k)$ – ν_3 -мерный вектор измерений, $\tilde{y}(k) \in Y^{\nu_3}$; \tilde{A}_1 , \tilde{B}_1 , C_1 и \tilde{D}_1 – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей.

Машинная диагностическая ML-модель [8] для i -го класса отказов описывается в виде:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G_1 \Delta x(k) + [A_{\alpha_i} \hat{x}(k) + B_{\alpha_i} u(k)] \Delta \alpha_i; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + [D_{\alpha_i} u(k) + F_{\alpha_i}] \Delta \alpha_i; \\ \Delta x(k_0) &= \tilde{x}_0,\end{aligned}\quad (2)$$

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

При использовании для воспроизведения эталонного поведения объекта фильтра Люенбергера в такой форме:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k+1) &= G \hat{x}(k) + K \tilde{y}(k) + B u(k); \\ \hat{y}(k) &= C \hat{x}(k); \quad \hat{x}(k_0) = 0,\end{aligned}\quad (3)$$

где $\hat{x}(k)$ – n -мерная оценка вектора состояния системы; G , K , B и C – матрицы фильтра соответствующих размерностей, машинная диагностическая

ML-модель для γ_i -го параметра будет описываться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G \Delta x(k) + [A \gamma_i \hat{x}(k) + B \gamma_i u(k)] \Delta \gamma_i; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k); \quad \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0,\end{aligned}\quad (4)$$

где $\Delta x(k) = \tilde{x}(k) - \hat{x}(k)$; $A \gamma_i$, $B \gamma_i$ – матрицы коэффициентов чувствительности матриц \tilde{A}_3 , \tilde{B}_3 по параметру γ_i ; $\Delta \gamma_i = \gamma_i - \gamma_{in}$, γ_{in} – номинальное значение параметра.

Для линеаризуемого объекта с известной структурой МДМ строят для штатных режимов функционирования посредством параметрической идентификации моделей вида

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A x(k) + B u(k); \\ y(k) &= C x(k); \quad x(k_0) = 0.\end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned}\Delta y(k) &= \tilde{y}(k) - \hat{y}(k); \quad \forall k, k \in T; \\ s_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_k |\Delta y_j(k)| \geq \delta_{j0}; \\ 0 & \text{при } \sum_k |\Delta y_j(k)| < \delta_{j0}; \quad \forall k \in T; j = \overline{1, m}, \end{cases}\end{aligned}\quad (5)$$

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).

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

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G \Delta x(k) + A \gamma_i \hat{x}(k) \Delta \gamma_i + B \gamma_i u(k) \Delta \gamma_i; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k); \quad \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0.\end{aligned}\quad (6)$$

Преобразуем уравнения (6) к виду

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

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 $C[A\gamma_i \quad B\gamma_i] = L\gamma_i$ и введем вектор сигналов $\mathcal{Y}_{\gamma_i}^T(k) = [\hat{x}(k) \quad u(k)]$. Тогда с учётом новых обозначений

$$\Delta y(k+1) = G'\Delta y(k) + L\gamma_i \mathcal{Y}_{\gamma_i} \Delta\gamma_i; \Delta y(k_0) = \tilde{y}_0. \quad (7)$$

По сути, это уравнение описывает отклонения возмущенного движения объекта относительно эталонного поведения, воспроизводимого фильтром Льюенбергера.

Для устранения отклонения $\Delta y(k)$, вызванного возмущением $\mathcal{Y}_{\gamma_i}(k)\Delta\gamma_i$, 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

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= G'\Delta y(k) + L\gamma_i F[\delta(k)]; \\ \delta(k+1) &= \delta(k) + \psi(k)T_0, \end{aligned} \quad (8)$$

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.

Для синтеза контуров восстановления работоспособности динамических объектов, а также для оценки качества функционирования функционально устойчивого объекта использовать критерий в форме функций Ляпунова

$$V[\Delta y(k)] = \Delta y^T(k)Q\Delta y(k); V[\Delta y(k)] = \|\Delta y(k)\|, \quad (9)$$

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 спутниковой системы стабилизации и ориентации в целом.

Заключение

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. Также представлен класс диагностических функциональных моделей и класс логических функциональных моделей, связывающих прямые диагностические признаки с косвенными. Описаны методы их анализа, обеспечивающие как взаимную однозначность такой связи, так и оптимизацию совокупности косвенных признаков отказов для диагностирования динамических объектов. Сведена разработка диагностического обеспечения к разработке алгоритмического обеспечения типового модуля диагностирования функционального состояния. Приведена схема разработки, базирующаяся на формировании дихотомического дерева с помощью решения обратных задач в классе предложенных диагностических функциональных моделей. Изложены модели и средства восстановления работоспособности динамического объекта с помощью модифицированных диагностических моделей и с использованием второго метода А.М.Ляпунова. Сформирована схема разработки алгоритмического обеспечения типового модуля восстановления работоспособности динамического объекта. Представлены, в результате проведенных исследований терминологической базы научного направления функционально устойчивого управления, основные понятия, способствующие конструктивному изложению основных положений концепции. Сформулированы основные положения обеспечения функциональной устойчивости, базирующиеся на принципе самоорганизации посредством глубокого диагностирования, аварийного функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности объекта. Изложены особенности глубокого диагностирования систем стабилизации и ориентации, заключающиеся в трактовке отказа как неопределённого события, которое конкретизируется с помощью принципа последовательного снятия неопределённости. Приведены особенности парирования отказов на трёх уровнях обеспечения отказоустойчивости спутниковых систем ориентации и стабилизации с помощью гибкого восстановления работоспособности на основании принципа соответствия избыточных ресурсов выявленным видам отказов. Описана, с помощью введенных основных понятий и сформулированных положений, методология обеспечения функциональной устойчивости спутниковых систем стабилизации и ориентации.

Литература

1. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 2. Проектирование систем управления космических аппаратов и модулей орбитальных станций [Текст]: учебник в 3 т. / Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев и др./ под общей ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "Харьк. авиац. ин-т", НПП Хартрон-Аркос, 2012. – 680 с.

2. Проектирование систем управления объектов ракетно-космической техники. Т. 3. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники [Текст]: учебник в 3 т / А. Ю.С. Алексеев, Е.В. Белоус, Г.В. Беляев и др./ под общей ред. Ю.С. Алексеева, Ю.М. Златкина, В.С. Кривцова, А.С. Кулика, В.И. Чумаченко. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. Ин-т», НПП «Хартрон-Аркос», 2012. – 501 с.

3. Фирсов, С.Н. Диагностика технического состояния системы автоматического при наличии внешних не контролируемых возмущений [Текст] / С.Н. Фирсов // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – Вып. 4 (16). – С. 79 – 82.

4. Фирсов, С.Н. Аналитический метод определения параметров управления системы ориентации космического аппарата [Текст] / С.Н. Фирсов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №4 (91). – С. 55 – 59.

5. Фирсов, С.Н. Диагностирование функционального состояния электромеханического блока космического аппарата [Текст] / С.Н. Фирсов, А.Н. Таран // Системы обработки информации: сб. научных праць Харківського ун-ту повітряних сил ім. Івана Кожедуба – Вып. 2 (83). – К., 2010. – С. 174 – 181.

6. Таран, А.Н. Концепция обеспечения живучести спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией [Текст] / А.Н. Таран, С.Н. Фирсов, И.В. Бычкова // Системы обработки информации: сб. научных праць Харківського ун-ту повітряних сил ім. Івана Кожедуба – Вып. 8 (98). – К., 2011. – С. 127 – 129.

7. Диагностическое обеспечение системы управления ориентацией и стабилизации малого спутника [Текст] / А.С. Кулик, С.Н. Фирсов, А.Н. Таран, О.А. Лученко // Управление движением и навигация летательных аппаратов научн. тр. Самарского технического университета им. С.П. Короленка. – Вып. 1. – Самара, 2012. – С. 108 – 111.

Поступила в редакцию 21.12.2012, рассмотрена на редколлегии 16.01.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений Н.Д. Кошевой, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

МЕТОДОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ І СТАБІЛІЗАЦІЇ

С.М. Фірсов

Сформульовані основні положення методології забезпечення функціональної стійкості супутникових систем стабілізації та орієнтації, що базуються на принципі самоорганізації шляхом глибокого діагностування аварійного функціонального стану і гнучкого відновлення працездатності об'єкта. Введено поняття та запропоновано математичний опис динамічного об'єкта діагностування і відновлення працездатності. Представлений клас діагностичних функціональних моделей і клас логічних функціональних моделей. Викладено моделі і засоби відновлення працездатності динамічного об'єкта за допомогою модифікованих діагностичних моделей і з використанням другого методу О.М. Ляпунова.

Ключові слова: функціональна стійкість, діагностування, позаштатна ситуація, самоорганізація, відновлення.

METHODOLOGY OF MAINTENANCE OF FUNCTIONAL STABILITY OF ORIENTATION AND STABILIZATION SATELLITE SYSTEMS

S.N. Firsov

The main points of methodology of maintenance of functional stability of stabilization and orientation satellite systems based on the principle of self-organization through deep diagnosis of the emergency functional state and flexible restoration of object's operating state are stated. The concept and mathematical description of the dynamic object's diagnosing and restoration of its operating state are offered. Class of diagnostic functional models and class of logical functional models are presented. Models and resources to restore operating state performance of dynamic object which use modified diagnostic models and the second method A. M. Lyapunov are described.

Keywords: functional stability, diagnosis, emergency situation, self-organization, restoration.

Фирсов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Firsov@d3.khai.edu.