УДК 629.7+531.3+532.6 https://doi.org/10.15407/itm2020.01.042

В. В. ГОРБУНЦОВ, А. Н. ЗАВОЛОКА

ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ЦЕЛЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТА РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: office.itm@nas.gov.ua

Мета статті – формування дискретно-подієвого підходу до розробки науково-методичного забезпечення (НМЗ) проектування бортової активної системи підтримки цільової ефективності (БАСПЦЕ) об'єкта ракетно-космічної техніки (ОРКТ). Матеріали і методи дослідження: дискретно-подієві моделі БАСПЦЕ. Сформульовано типову модельну задачу активної підтримки цільової ефективності ОРКТ, що передбачає виявлення і локалізацію несправностей (ВЛН) у разі виникнення відмов (непередбачених порушень працездатного стану) систем і агрегатів ОРКТ. БАСПЦЕ повинна забезпечувати: 1) розв'язання задачі ВЛН з необхідною точністю і якомога раніше (перш ніж несправності створять серйозні проблеми для справного функціонування ОРКТ); 2) перебудову алгоритму системи управління (СУ) ОРКТ, тобто адаптацію алгоритму до умов функціонування об'єкта в області несправних станів так, щоб СУ продовжувала задовольняти поставленим цілям управління і, по можливості, забезпечувала його оптимальність; 3) реалізацію супервізорного управління шляхом вироблення оптимальної послідовності активних управляючих дій, що обмежують поведінку ОРКТ і таким чином забезпечують постійне його перебування в області допустимих станів. Обговорюються можливості використання для проєктування БАСПЦЕ алгоритмів дискретно-подієвого моделювання (ДПМ), що спираються на поняття спостерігаємості, діагностуємості і супервізорного управління в дискретно-подієвих системах. Пропонований підхід ілюструється рішенням, з використанням алгоритмів алгебраїчної теорії діоїдів, модельної задачі організації циклічної інспекції двох агрегатів ОРКТ з урахуванням вимоги синхронізації роботи відповідних блоків системи моніторингу робочого стану ОРКТ. Дискретно-подієвий підхід доцільно застосовувати при розробці НМЗ проектування БАСПЦЕ. Основна перевага використовування ДПМ – не треба деталізованого моделювання системи, що розглядається.

Ключові слова: *активна система управління, алгебраїчна теорія діоїдів, виявлення і локалізація несправностей, дискретно-подієве моделювання, діагностуємість, об'єкт ракетно-космічної техніки, підтримка цільової ефективності, супервізорне управління.*

Цель статьи – формирование дискретно-событийного подхода к разработке научно-методического обеспечения (НМО) проектирования бортовой активной системы поддержки целевой эффективности (БАСПЦЭ) объекта ракетно-космической техники (ОРКТ). Материалы и методы исследования: дискретно-событийные модели БАСПЦЭ. Сформулирована типовая модельная задача активной поддержки целевой эффективности ОРКТ, предусматривающей обнаружение и локализацию неисправностей (ОЛН) в случае возникновения отказов (непредвиденных нарушений работоспособного состояния) систем и агрегатов ОРКТ. БАСПЦЭ должна обеспечивать: 1) решение задачи ОЛН с требуемой точностью и как можно раньше (прежде чем неисправности создадут серьезные проблемы для исправного функционирования ОРКТ); 2) перестройку алгоритма системы управления (СУ) ОРКТ, т. е. адаптацию алгоритма к условиям функционирования объекта в области неисправных состояний таким образом, чтобы СУ продолжала удовлетворять поставленным целям управления и, по возможности, обеспечивала его оптимальность; 3) реализацию супервизорного управления путём выработки оптимальной последовательности активных управляющих воздействий, ограничивающих поведение ОРКТ и таким образом обеспечивающих постоянное его пребывание в области допустимых состояний. Обсуждаются возможности использования для проектирования БАСПЦЭ алгоритмов дискретно-событийного моделирования (ДСМ), опирающихся на понятия наблюдаемости, диагностируемости и супервизорного управления в дискретно-событийных системах. Предлагаемый подход иллюстрируется решением, с использованием методов алгебраической теории диоидов, модельной задачи организации циклической инспекции двух агрегатов ОРКТ с учётом требования синхронизации работы соответствующих блоков системы мониторинга рабочего состояния конструкции ОРКТ. Дискретно-событийный подход целесообразно использовать при разработках НМО проектирования БАСПЦЭ. Основное преимущество использования ДСМ – не требуется детализированное моделирование рассматриваемой системы.

Ключевые слова: *активная система управления, алгебраическая теория диоидов, диагностируемость, дискретно-событийное моделирование, обнаружение и локализация неисправностей, объект ракетно-космической техники, поддержка целевой эффективности, супервизорное управление.*

The aim of this paper is to elaborate a discrete event approach to the development of a methodology for the design of an onboard active system of goal-oriented efficiency support (OASGOES) for a rocket. Materials and methods: OASGOES discrete event models. Results and discussion. A typical model problem is formulated concerning active support of rocket goal-oriented efficiency, which provides for the detection and localization of failures (unforeseen malfunctions) of rocket systems and assemblies. The OASGOES must: (1) detect and localize failures with a required accuracy and as early as possible (before the failures pose major problems for the rocket operation), (2) alter the algorithm of the rocket flight control system, i. e., adapt the algorithm to the rocket operation under failure conditions so that the flight control system may continue to accomplish the control objectives and, as far as possible, provide optimal control, and (3) implement supervisory control by generating an optimal sequence of active control actions that restrict the behavior of the rocket and thus continuously keep it within the admissible state region. The paper discusses possibilities of OASGOES design with the use of discrete event simulation (DES) algorithms, which rely on the notions of observability, diagnosability, and supervisory control in discrete event systems. The proposed approach is illustrated by solving, with the use of methods of the algebraic dioid theory, the model problem of organization of a cyclic inspection of two rocket assemblies taking into account the required synchronous operation of the relevant blocks of the structural health monitoring system. Conclusions. It is expedient to use the discrete event approach in the development of a methodology for OASGOES design. The DES basic advantage is freedom from a detail simulation of the system under consideration.

Keywords: *active control system, algebraic dioid theory, failure detection and localization, discrete event simulation, diagnosability, rocket, goal-oriented efficiency support, supervisory control.*

1 Развитие концепции активной поддержки целевой эффективности объекта ракетно-космической техники (ОРКТ). В течение всего времени хранения, подготовки к пуску и полета на активном участке траектории, ОРКТ может оказаться подверженным разнообразным возмущающим воздействиям, которые, в зависимости от условий хранения и полёта, могут включать как механические, вибрационные и тепловые нагрузки, так и широкий диапазон воздействий возможных дефектов конструкции. Поэтому интерес к вопросам повышения уровня автоматизации технического обслуживания (ТО) и оперативности процедур пуска ОРКТ вполне оправдан – безотносительно к тому, рассматривать ли ОРКТ как средства выведения космических аппаратов или же как боевые единицы, которые могут быть запасены впрок и использованы непосредственно в ходе военного конфликта.

Обеспечение повышения оперативности и надёжности современных ОРКТ предполагает широкое использование новых достижений информационной технологии для разработки бортовой активной системы поддержки целевой эффективности (БАСПЦЭ), функционирующей в масштабе реального времени и позволяющей планировать и проводить пуски ОРКТ с учетом как динамически изменяющихся условий полета, так и данных системы мониторинга рабочего состояния конструкции (МРСК) подготавливаемого к пуску (или ужѐ находящегося в полёте) ОРКТ.

Однако данные, измеренные системой МРСК, сами по себе, не несут информации о локализации и типе дефекта, возникшего в конструкции. Эти данные требуют последующей обработки с использованием алгоритмов системы объективного контроля (СОК), которые превращают измеренные данные в технически значимые величины, позволяющие не только локализовать дефекты, но и определяют степень их серьезности. Поэтому, как таковая, система МРСК должна стать частью СОК (говоря о комплексе СОК / МРСК, мы тем самым подчеркиваем, что понятие СОК предполагает наличие и системы МРСК). Возможности комплекса СОК / МРСК могут быть существенно расширены на основе системы активного управления (САУ) ОРКТ, функционирующей с использованием данных СОК / МРСК; при этом САУ либо подключает для решения своих задач традиционные управляющие органы (УО) ОРКТ, либо оперирует собственными УО.

Таким образом, реализация БАСПЦЭ предполагает наличие на борту ОРКТ:

– комплекса СОК / МРСК, обеспечивающего объективную информацию о состоянии ОРКТ и работе его бортовых систем;

– САУ, обеспечивающей компенсацию недопустимых деформаций и/или дефектов элементов конструкции ОРКТ активными управляющими средствами с использованием данных системы МРСК.

Первые образцы объединенных систем САУ / СОК / МРСК были созданы к концу 1970-х – началу 1980-х гг., найдя применение как в промышленно-гражданском строительстве (мостостроение, разработка сейсмостойких конструкций) [1], так и в аэрокосмической отрасли [2, 3]. Расширяющийся фронт работ в этой перспективной области потребовал соответствующей стандартизации; и в 2003 г. 5-й Подкомитет 108-го Технического комитета Международной организации по стандартизации [International Standards Organization (ISO) Technical Committee 108 / Subcommittee 5] завершил разработку стандарта ISO-13374 “Condition Monitoring and Diagnostics of Machines” (Мониторинг состояния и диагностика машин) [4] (хотя в названии стандарта использован термин «машины», концепция ISO-13374 охватывает и проблемы аэрокосмической отрасли). А в 2011 г. был утвержден и введен в действие соответствующий стандарт РФ, устанавливающий руководство по разработке процедур прогнозирования технического состояния (ТС) машин [5].

Результаты оценки возможности активного вмешательства в управление полетом летательных аппаратов (ЛА) на основе объективной информации о различных процессах, сопровождающих полет, отражены в ряде обзоров [2, 3], посвященных использованию систем САУ / СОК / МРСК на истребителях и транспортных самолетах; перечислим основные практически решенные задачи активной поддержки целевой эффективности ЛА:

– после серии фатальных катастроф с самолетами de Havilland Comet, произошедших в 1952 – 1954 гг., была введена в эксплуатацию система мониторинга углового ускорения вокруг центра масс (ЦМ) самолета, позволяющая контролировать превышение определенных уровней нагрузок [3];

– полностью активная система снижения маневренных нагрузок и нагрузок от порыва ветра была разработана, прошла летные испытания и была установлена на военно-транспортном самолете Lockheed C-5A; полученная таким образом «Активная система управления распределением подъёмной силы» (Active Lift Distribution Control System – ALDCS) реализовывалась компьютером ALDCS и установленной на самолете системой основных сервоприводов [6];

– наряду с разработкой ALDCS-системы, были разработаны и установлены на ряде ЛА (Боинг 747, Lockheed L-1011 Tristar, Boeing-787 Dreamliner) ещё несколько видов систем разгрузки, большей частью нацеленных на ослабление действия порыва ветра для улучшения режима полета [6, 7];

– в систему стабилизации тяжелых ракет-носителей (РН) введен контур разгрузки корпуса (КРК), обеспечивающий, путем управления по углам атаки и скольжения, снижение аэродинамических нагрузок на корпус РН при действии ветровых возмущений; такого рода КРК реализованы на ЛА «Спейс-Шаттл» (США), РН «Энергия» (СССР), «Зенит» (Украина, РФ), «Ариан» (Франция) [8].

Достигнутые результаты характеризуют систему САУ / СОК / МРСК как перспективное средство управления ОРКТ, позволяющее обеспечить сокращение веса конструкции, уменьшение прямых эксплуатационных расходов и, в частности, снижение расхода топлива и увеличение усталостной долговечности (наработки до усталостного разрушения) ОРКТ. Указанные обстоятельства стимулируют разработки быстродействующих алгоритмов активного управления движением РН на основе данных МРСК; при этом одним из самых критичных компонентов РН, естественно, считается корпус [8 – 11]. Однако максимальные возмущения сил, действующих на активном участке полёта, могут приводить не только к разрушению конструкции, но и к нарушению нормальной работы приборов системы управления полетом (СУП), подачи топлива в жидкостной ракетный двигатель и т. п. В [12 – 16] была сформулирована и формализована расширенная задача МРСК корпуса и системы топливоподачи двигателя РН как задача получения в течение всего времени полёта фактических данных, позволяющих осуществлять как непрерывную идентификацию гибкой линии корпуса РН, так и гидродинамической обстановки (ГДО) в топливных баках (ТБ) с целью обеспечения:

– парирования недопустимых деформаций элементов конструкции, возникающих в процессе полета РН на активном участке траектории;

– устойчивости движения вокруг ЦМ гибкой РН с учётом колебаний жидкости в ТБ;

– активного управления ГДО в ТБ по параметру содержания свободных газовых включений на входе в топливные магистрали двигателя, основанного на использовании данных о текущем состоянии РН.

Оставшаяся часть статьи посвящена обсуждению практических возможностей дальнейшего расширения задач, решаемых объединенной системой САУ / СОК / МРСК.

2 Расширенная постановка задачи активной поддержки целевой эффективности ОРКТ. Постоянное стремление проектировщиков к расширению диапазона задач, решаемых ОРКТ в условиях действующих в полёте возмущений и при наличии жестких весовых ограничений, предопределяет необходимость повышения полноты использования бортовых ресурсов ОРКТ, прежде всего прочностных и энергетических; это обстоятельство обусловило возрастающий интерес к расширенной постановке задачи активной поддержки целевой эффективности, позволяющей обеспечивать [17, 18]:

– активное управление полетом на основе объективной информации о текущем состоянии основных систем ОРКТ, а так же результатов прогноза развития этих состояний, получаемых на борту в реальном масштабе времени;

– устранение соответствующими бортовыми средствами нежелательного характера развития нештатных ситуаций, с целью обеспечения безопасности эксплуатации ОРКТ и эффективного использования бортовых энергетических и прочих ресурсов;

– формирование бортовыми системами параметров управления, наилучшим образом обеспечивающих выполнение задач полёта, включая и целесообразное перераспределение функциональных задач для ступеней, двигательных установок (ДУ) в конкретно сложившихся условиях (когда условия эксплуатации или режимы работы бортовых систем отличаются от номинальных, но технические возможности ОРКТ позволяют продолжать полет).

Для решения таких задач требуется реализация двух различных видов объединенной системы САУ / СОК / МРСК, обеспечивающих на активном участке траектории полета ОРКТ [9]:

– мониторинг эксплуатационных нагрузок / режимов, цель которого – измерение нагрузок (деформации, температуры, напряжения) в течение всего времени эксплуатации ОРКТ; такая система МРСК поддерживает базу данных реальных нагрузок, действующих на компоненты конструкции, которые контролируются в течение операции;

– мониторинг повреждений, цель которого – определить вид повреждения (например, развитие усталостной трещины в металлах или возникновение расслоения в композитах, их расположение и размер) в течение периода эксплуатации ОРКТ.

В качестве основы формирования такого подхода целесообразно использовать вычислительные методы дискретно-событийного моделирования (ДСМ), описывающие модели динамических систем, в которых изменение состояния системы происходит из-за возникновения некоторых событий, возможно, через нерегулярные промежутки времени [18]. Одно из главных преимуществ дискретно-событийного подхода (ДС-подхода) – в том, что он не требует детализированного моделирования объекта управления (ОУ) и, следовательно, идеально подходит для моделирования сложных комплексных систем, таких как ОРКТ.

Как и в случае активных систем снижения маневренных нагрузок на корпус ЛА, инициатива по разработке СУП, поддерживающей обе вышеперечисленные функции системы САУ / СОК / МРСК, первоначально возникла в авиационных проектных организациях. Проектировщики ЛА, постоянно оценивая различные методологии, направленные на снижение стоимости, повышение готовности, работоспособности и надежности перспективных ЛА, естественно концентрировали своё внимание и на совершенствовании технологий МРСК – с целью расширить их использование на современных и будущих системах воздушного транспорта. В частности, повысилось внимание к разработке объединенных систем САУ / СОК / МРСК – комплексной системы управления (КСУ), способной определить техническое состояние самолета в целом, основываясь на интегральной оценке состояния его различных подсистем. По мере необходимости, КСУ могла бы взаимодействовать с СУП, гарантируя успех выполнения полетного задания. Такая интеграция обуславливает необходимость разработки и внедрения соответствующих методов и интегрированных средств контроля ТС самолета как единого функционирующего объекта.

Для обеспечения эффективности предпринимаемых в этом направлении шагов потребовалась разработка и внедрение информационно-диагностической системы (ИДС) обеспечения ТО самолета; некоторое представление об организации и основных направлениях работ по проектированию ИДС можно получить из [19, 20]. По своей структуре, ИДС представляет собой совокупность взаимосвязанных измерительных, вычислительных и информационно-справочных средств обеспечения ТО самолета, базирующихся на современных компьютерных технологиях. Один из вариантов структуры ИДС представлен в [20]; к его задачам относятся:

– получение, сбор и обработка диагностической информации с оцениванием параметров ТС самолета на всех этапах его эксплуатации;

– контроль функционирования ДУ, КСУ и другого оборудования самолета с установлением фактов выхода их параметров за индивидуальные для конкретного ОУ допуски (углубленный контроль работоспособности);

– поиск отказов с определением причин выхода контролируемых параметров за установленные эксплуатационные и индивидуальные для конкретного ОУ допуски (диагностирование);

– оценка тенденций изменения показателей текущего ТС самолета для определения объема и сроков профилактических работ (прогнозирование).

Первые результаты внедрения ИДС «АРС ДК-30 (СД) серия М» [20] в основном подтвердили правильность выбранных технических решений при реализации концепции создания и внедрения ИДС, в том числе и для самолетов поколения 4++. Результаты, достигнутые в США и РФ по внедрению ИДС на самолетах пятого поколения, нам не известны, а по архитектуре и алгоритмам этих ИДС к настоящему времени доступны лишь материалы самого общего содержания [20]. Главная роль в решении задач контроля ТС самолетов отводится бортовой автоматизированной системе контроля (БАСК), которая, с учетом анализа на наземном устройстве обработки (НУО) полетной информации, накопленной в бортовом устройстве регистрации (БУР), позволит контролировать исправность всего самолета и максимально обеспечит возможность оперативного принятия решения об его очередном вылете. Для комплексного решения задач, возлагаемых на БАСК, НУО и БУР, их целесообразно информационно объединить в ИДС.

Переходя к формулировке расширенной постановки задачи активной поддержки целевой эффективности ОРКТ, необходимо сразу же подчеркнуть качественное отличие БАСК, предназначенной для самолётов, и БАСПЦЭ – для ОРКТ: если время функционирования БАСК измеряется часами (что позволяет анализировать ситуацию «на земле» с привлечением НУО), то время функционирования БАСПЦЭ на активном участке полета, например, РН – десятки минут, причем работа БАСПЦЭ предполагается полностью автономной. Указанное обстоятельство вполне оправдывает применение к объединенной системе САУ / СОК / МРСК, предназначаемой для использования на ОРКТ, термина «бортовая активная система поддержки целевой эффективности (БАСПЦЭ)»; этот термин вынесен и в заглавие статьи.

Поддерживая взаимодействие между ОРКТ и его СУП, БАСПЦЭ должна включать в себя не только обычную обратную связь (ОС), но и механизм принятия решения более высокого уровня, определяющий конфигурацию адаптивной СУП. Этот механизм:

– анализирует поведение ОРКТ (чтобы идентифицировать неисправности);

– обладает способностью реагировать на наличие неисправности путем приложения управляющих воздействий к нештатному поведению ОРКТ (чтобы удерживать его в области штатного функционирования).

Для осуществления этих мер, БАСПЦЭ использует имеющиеся на ОРКТ исполнительные органы (ИО), так что в течение всего времени полета ОРКТ находится в области штатного функционирования (в которой ОРКТ удовлетворительно выполняет свои функции). Если эти меры успешны, функционирование ОРКТ остается удовлетворительным и после проявления дефекта (возможно – по истечении краткого промежутка времени нештатной работы). Таким образом алгоритм управления адаптируется к нештатному режиму функционирования, и ОРКТ в целом продолжает удовлетворять техническим требованиям (ТТ).

Рассмотрим особенности алгоритмов БАСПЦЭ и методы их исследования подробнее, используя стандартную терминологию, принятую разработчиками отказоустойчивых систем [21]: работоспособное (неработоспособное) состояние, исправность (неисправность), повреждение, дефект, отказ, авария. Неисправность переводит ОРКТ из области штатного функционирования в область работы в условиях ухудшения характеристик; последняя лежит между областью штатного функционирования (в которой ОРКТ всегда должен оставаться) и областью нештатного функционирования (опасной зоной), которую ОРКТ никогда не должен достигать. Во избежание снижения качества функционирования или повреждений (аварий) ОРКТ, наличие неисправностей необходимо обнаружить как можно раньше (прежде чем они создадут серьезные проблемы для штатного функционирования ОРКТ) и выработать аппаратное решение, направленное на приостановление распространения их влияния.

Попадание в опасную зону можно избежать, используя БАСПЦЭ, которая должна быть способной препятствовать дальнейшей деградации работы ОРКТ, ведущей в опасную зону, и обеспечить переход ОРКТ обратно в область штатного функционирования. При этом БАСПЦЭ, несмотря на неопределенности модели ОРКТ и возмущающие воздействия, должна обеспечивать пребывание ОРКТ в области штатного функционирования и, возможно, даже сохранять в этой области эффективное (оптимальное) управление при наличии незначительных дефектов ОРКТ.

Для предотвращения попадания в опасную зону (появления возможных отказов), на борту ОРКТ в режиме on-line должна решаться задача обнаружения и локализации неисправностей (ОЛН); будем трактовать проблему ОЛН как комплексную проблему дефектоскопии и изоляции, включающую [22]:

– обнаружение неисправности – принимается решение, возникла ли неисправность, а также определяется момент времени её возникновения;

– локализацию неисправности – определяется место повреждения (дефекта), т. е. в каком компоненте ОРКТ возникла неисправность;

– идентификацию и оценку степени тяжести дефекта.

Главная задача ОЛН – разработать методологию для идентификации и точной характеристики возможных зарождающихся отказов, возникающих в процессе функционирования ОРКТ. Механизм ОЛН традиционно обеспечивается путём дублирования технических средств; эта техника может быть реализована двумя способами:

– как аппаратная избыточность – с использованием процедуры группирования результатов идентичных измерительных устройств (ИУ);

– как аналитическая избыточность – задачу ОЛН можно решить, используя аналитическую и функциональную информацию об ОУ или, другими словами, используя математическую модель ОРКТ.

Достаточно подробный обзор состояния вопроса диагностирования динамических систем до 2000-х гг. дан в [23]; подробное введение в диагностику неисправностей с использованием методов идентификации приведено в [24]. Главная задача исследований в области практического использования аналитических методов ОЛН применительно к ЛА, которые широко обсуждаются с различных точек зрения [2, 3], – изучать методологии локализации и точной характеристики предположительно зарождающихся дефектов, возникающих в заранее намеченных частях ЛА. Этого обычно достигают, разрабатывая динамичную систему (фильтр), которая, обрабатывая данные входа / выхода СУП, может обнаружить присутствие развивающегося дефекта и, в конечном счете, точно локализовать его [25].

Как только дефект обнаружен и локализован, следующий естественный этап – изменить закон управления ОРКТ таким образом, чтобы обеспечить управление, устойчивое к наличию дефекта, а именно, чтобы гарантировать заранее указанные эксплуатационные качества для дефектной системы. На этом шаге фаза ОЛН обычно завершается разработкой отказоустойчивого управления, а именно разработкой механизма перенастраивания алгоритма управления, который, на основании информации, обеспеченной фильтром ОЛН, перенастраивает алгоритм управления таким образом, чтобы достичь предписанного качества функционирования также и дефектной системой. На этой стадии могут быть использованы различные подходы к управлению в нештатной ситуации, например:

– механическая реконфигурация (перенастройка) закона управления (путём переключения между избыточными аппаратными средствами или механическими системами);

– адаптивное робастное управление, которое имеет дело с изменениями модели ОРКТ, например, в некоторых задачах устранения неисправностей, ОРКТ начинает функционировать в штатном режиме и затем, возможно, входит в один из нештатных режимов, для каждого из которых могут иметься свои собственные ТТ; такая задача ОЛН может быть решена как задача робастного управления [26, 27];

– коммутация законов управления в супервизорном режиме: чтобы обеспечить допустимое поведение ОРКТ, его поведение изменяется с помощью некоторого супервизора (супервизорной СУ), который должен привести поведение системы (управляемой в супервизорном режиме) в рамки допустимого поведения (которое должно удовлетворять проектным ТТ), отключая некоторые регулируемые события, коль скоро это необходимо [28, 29].

Следовательно, поддержание штатного функционирования ОРКТ полностью зависит от наступления (появления) через некоторые промежутки времени ряда асинхронных дискретных событий – отказов; адекватное средство моделирования процессов такого рода дают методы ДСМ. Таким образом ОРКТ можно трактовать как дискретно-событийную систему (ДСС) – динамическую систему с дискретным пространством состояний и событийно-управляемым изменением состояний; динамика таких систем моделируется, как последовательность событий.

Однако не все такие последовательности, генерируемые ДСС, можно считать желательными (безопасными), с точки зрения обеспечения заданных ТТ; например, в системе может быть несколько запрещенных состояний, которые следует избегать. Поэтому ТТ могут быть реализованы в терминах множества допустимых последовательностей, или же их можно реализовать, применяя формализм теории конечных автоматов (КАв); основную терминологию теории КАв: детерминированный (недетерминированный) КАв, событие, состояние, азбука (алфавит), слово, строка, язык, – будем использовать в соответствии с [30]. Следуя терминологии ДСМ, заметим, что «отказ» является событием, в отличие от «неисправности», которая является состоянием ОРКТ. Состояния дискретно-событийной модели (ДС-модели) отображают штатные и нештатные состояния компонентов ОРКТ, в то время как события отказа образуют часть множества событий; проблема ОЛН – обнаружить возникновение таких событий.

Предположим, что диагностируемая система состоит из нескольких различных физических компонентов (обычно эти компоненты представляют собой оборудование и управляющие / контролирующие устройства, снабженные множеством датчиков). Сперва сформируем ДС-модели этих компонентов в виде КАв; они описывают как нормальное состояние, так и нештатное поведение компонентов. Некоторые из событий в этих КАв наблюдаемы (т. е. их появление может наблюдаться), а остальные – ненаблюдаемы; обычно к наблюдаемым событиям относят команды, формируемые БАСПЦЭ, в то время как ненаблюдаемые события включают события отказа ОУ. Используя ДС-модели компонентов, а также таблицы расшифровки показаний датчиков (их сенсорные карты), можно построить комплексную модель системы, которая описывает взаимодействия между компонентами.

Для отказоустойчивого управления требуется оценить расположение и величину дефекта, чтобы обеспечить подходящим образом выполнение следующего этапа ОЛН – переконфигурирование алгоритма управления; примем «диагностический подход» к диагностике неисправностей ДСС [31 – 33]. При таком подходе БАСПЦЭ контролирует как «нормальное» (штатное), так и «не соответствующее ТТ» (нештатное) поведение ОРКТ для заранее оговоренного множества дефектов, моделируемых как ненаблюдаемые (т. е. непосредственно не измеренные системными датчиками) события. Диагностирование – это процесс обнаружения on-line возникновения таких дефектов путем формирования (получения), на базе наблюдаемой последовательности событий в ОРКТ, логического вывода, основанного на модели ОРКТ. Это обеспечивается использованием специального вида КАв – блока диагностирования (БД), сформированного на основе модели ОУ [30].

Представим, следуя [31 – 33], комплексный подход к решению объединенной задачи управления и диагностирования, на которую мы будем ссылаться как на задачу активного безопасного диагностирования (ЗАБД). Термин «активный» используется, чтобы отличать этот метод от пассивного диагностирования, где роль БД – просто наблюдать поведение ОРКТ и делать выводы о возможных отказах. Решение задачи синтеза такого управления будет зависеть от анализа возможностей удовлетворить заданным ТТ, как, например:

– приемлемое функционирование ОРКТ (которое гарантирует, что поведение ОРКТ не ограничено более чем необходимо для того, чтобы, в конечном счете, обеспечить его диагностируемость);

– приемлемая задержка обнаружения отказов.

Оценивая перспективы технической реализации процедуры решения ЗАБД, будем ориентироваться на двухуровневую структуру диагностической ДСС [34]:

– на нижнем уровне диагностическая ДСС располагает множеством диспетчеров нижнего уровня, обеспечивающих МРС бортового оборудования ОРКТ и его многосвязное регулирование;

– на верхнем уровне диагностическая ДСС располагает супервизорным управляющим устройством (супервизором), который выполняет задачи [29]:

1) управления и координации диспетчеров нижнего уровня;
2) диагностики отказов;
3) локализации отказов;
4) реконфигурации (обновления) системы после идентификации отказа;
5) координации всех операций подсистем нижнего уровня.

Интерфейс между этими двумя уровнями обеспечивает передачу:

– в супервизор – информации относительно возникновения наблюдаемых событий в ОРКТ;

– в СУП – команд, подаваемых супервизором.

Предварительное представление о структуре диагностической ДСС верхнего уровня может дать [35]; здесь же обсудим особенности функционирования диагностической ДСС на нижнем уровне, разобрав в качестве примера частную задачу организации сбора данных для системы МРСК.

3 Пример задачи организации функционирования БАСПЦЭ на нижнем уровне: сетевой подход к сбору данных, проблема синхронизации, задача составления расписания. Чтобы точно идентифицировать свойства отдельных компонентов ОУ, контролируемые структуры оборудуют датчиками, расположенными в различных системах (агрегатах) ОУ. В ходе активного функционирования ОУ, БАСПЦЭ – через инкорпорированную в неё систему МРСК – организует периодическую инспекцию (возможно, совместно с процедурой восстановления работоспособности) отдельных узлов и агрегатов ОУ; количество таких циклов инспекции можно использовать в качестве одного из критериев эффективности работы системы МРСК.

Систему МРСК можно рассматривать как ДСС, основные особенности функционирования которой, в общем, предполагают параллелизм действий, требующий обеспечения [36]:

– циклического повторения некоторых схем процедуры мониторинга;

– совместного использования отдельными блоками системы МРСК общих ресурсов (энергетических, вычислительных) с учетом их ограниченности;

– синхронизации работы отдельных блоков системы МРСК;

– максимальной эффективности относительно некоторых критериев (например, максимальная производительность, минимальный диапазон разброса контролируемых параметров и др.) путём оптимального планирования операций мониторинга;

– отказоустойчивости системы обработки данных;

– защиты от ложной идентификации неисправности.

В данном примере рассмотрим возможности обеспечить выполнение первых четырёх требований приведенного выше перечня на базе использования методов ДСМ; целесообразность такого подхода определяется наличием адекватного математического аппарата анализа и синтеза алгоритмов управления ДСС, опирающегося на высокопроизводительные вычислительные методы алгебраической теории диоидов (Max-Plus алгебры, идемпотентной алгебры) [37 – 39]. Такой алгебраический подход позволяет уменьшить трудоемкость решения конкретных задач оптимального управления системы МРСК с использованием относительно простых (с вычислительной точки зрения) алгоритмов.

Естественно начать рассмотрение вопросов организации работы системы МРСК с решения задачи максимизации числа сеансов замеров. Следуя [38], рассмотрим простейший пример организации циклической инспекции двух агрегатов ОУ, которым соотнесены вершины S_1 и S_2 графа операций, изображенного на рис. 1. Вершины S_1 и S_2 соединены двумя взвешенными дугами, веса которых характеризуют затраты времени на подготовку системы МРСК к обработке агрегата S_1 (или S_2) после того, как агрегат S_2 (или S_1) был обработан:

– одна дуга ведет от S_1 к S_2; ей соответствуют затраты, равные a_{12} ед. времени;

– другая дуга ведет от S_2 к S_1, и ей соответствуют затраты равные a_{21} ед. времени.

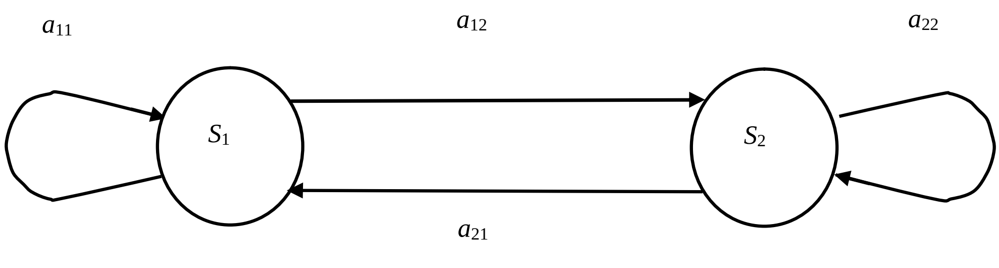

Рис. 1 – Схема организации циклической инспекции двух агрегатов S_1 и S_2

Кроме этих двух дуг, в каждой вершине имеется смежная петля, характеризующая затраты на обработку измерений в агрегате S_1 (или S_2), а именно a_{11} ед. времени – для агрегата S_1 и a_{22} ед. – для агрегата S_2 (конечно, может существовать ряд этапов обработки этих измерений, но поскольку они не будут играть никакой роли в данной задаче, они не указаны).

Требуется разработать расписание операций в этом графе, руководствуясь следующими критериями:

– затраты на проведение каждой операции установлены матрицей весов дуг графа, имеющей вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; \qquad (1)$$

– инспекции проводятся циклически и должны иметь регулярное расписание (т. е. частота инспекций должна быть одинаковой вдоль всех четырех дуг, давая расписание операций с регулярными временами их начала);

– частота инспекций (т. е. число инспекций за единицу времени) должна быть как можно более высокой;

– должна быть обеспечена гибкость расписания инспекций (чтобы управлять возможными задержками, если возникнет необходимость восстановления аварийного узла).

Кроме сформулированных выше требований по эффективности, укажем два правила, выполнение которых следует считать необходимым:

– операция подготовки системы МРСК к обработке измерений в агрегате S_1 (или S_2) должна строго предшествовать обработке измерений в этом агрегате (чтобы позволить выполнить такую подготовку);

– операция обработки измерений в агрегате (S_1 или S_2) начинается сразу же, как только это может быть позволено.

Эти две операции должны начинаться в одно и то же время – чтобы обеспечить выполнение требования:

– синхронизации этих двух операций;

– завершения процедуры как можно быстрее.

Пусть x_1 – общее время начала обеих операций, относящихся к вершине S_1; одна из них обеспечивает подготовку системы МРСК к проведению замеров, связанных с вершиной S_2, а другая – обработку замеров, связанных с вершиной S_1. Аналогично, x_2 – это общее время начала двух операций, относящихся к вершине S_2. Времена начала операций, относящиеся к обеим вершинам, представим вектором $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$. Тогда исходное время начала цикла операций, соответствующее моменту активации системы МРСК, запишем как $\mathbf{x}(0)$, а последующие моменты времени, соответствующие смене операций, запишем как $\mathbf{x}(1)$, $\mathbf{x}(2)$ и т. д.

Таким образом, время начала k-го цикла операций задаётся вектором $\mathbf{x}(k - 1)$; эти смены циклов операций будем рассматривать как события в модели системы. В соответствии с приведенными выше правилами, потребуем, чтобы $(k + 1)$-я операция, связанная с вершиной S_1, начиналась не ранее, чем завершится предыдущий цикл операций, обеспечивающих подготовку системы МРС к проведению замеров в вершине S_1 (как видно из рис. 1, после выполнения замера в вершине S_2 – в момент времени $x_2(k)$ – системе потребуется a_{21} ед. времени на перестройку для выполнения замера в вершине S_1) и обработку замеров, полученных в этой вершине (на что потребуется a_{11} ед. времени):

$$x_1(k+1) \geq \max(x_1(k)+a_{11}, x_2(k)+a_{21}).$$

Аналогичным образом, время начала обеих операций, связанных с вершиной S_2, должно удовлетворять требованию:

$$x_2(k+1) \geq \max(x_1(k)+a_{12}, x_2(k)+a_{22}).$$

Так как частота смены циклов должна быть как можно более высокой, а каждый цикл должен начинаться как можно быстрее, неравенства в последних двух выражениях, фактически, следует заменить равенствами, что приводит к системе:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= \max(x_1(k)+a_{11}, x_2(k)+a_{21}); \\ x_2(k+1) &= \max(x_1(k)+a_{12}, x_2(k)+a_{22}). \end{aligned} \quad (2)$$

В общем виде функциональное уравнение (2) можно записать более компактно в векторной форме:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \otimes \mathbf{x}(k), \quad (3)$$

где матрица **A** принимается в соответствии с (1), а использование обозначения $\otimes$ указывает, что описываемый процесс представлен не в терминах обычной линейной алгебры, а в терминах алгебры диоидов [37].

Предлагаемый подход позволяет оценивать реализуемость и устойчивость расписания инспекций, используя методы спектрального анализа над (max, +)-алгеброй (поскольку понятие собственного значения и собственного вектора может быть распространено на алгебру диоидов). Существование собственных значений и собственных векторов в алгебре диоидов более подробно изучается в [39], там же предоставлены эффективные расчетные схемы для их вычисления. Подробный разбор ДСС, подобных изображенной на рис. 1 и описываемых функциональными уравнениями (2), выполнен в ряде работ (ссылки можно найти в [38]).

Выводы

1. Дискретно-событийное моделирования целесообразно использовать как основу научно-методического обеспечения анализа и синтеза алгоритмов бортовой активной системы поддержки целевой эффективности объекта ракетно-космической техники. Основное преимущество ДСМ – в том, что оно не требует детализированного моделирования диагностируемой системы и, следовательно, хорошо подходит для исследования технических систем, сложных для моделирования, таких как ОРКТ.

2. Целесообразность предлагаемого подхода определяется наличием адекватного математического аппарата анализа и синтеза алгоритмов управления дискретно-событийными системами, опирающегося на высокопроизводительные алгебраические вычислительные методы теории диоидов, которые позволяют уменьшить трудоемкость моделирования процесса мониторинга работоспособного состояния ОРКТ с использованием относительно простых вычислительных процедур.

1. *Datta T. K.* A state-of-the-art review on active control of structures (22nd ISET Annual Lecture). ISET Journal of Earthquake Technology. 2003. Vol. 40, No. 1. P. 1–17.
2. *Flight* control systems: practical issues in design and implementation: Ed. R. W. Pratt. Reston: The Institution of Electrical Engineers, 2000. 408 p.

3. *Boller C., Meyendorf N.* State-of-the-Art in Structural Health Monitoring for Aeronautics. Proc. of Internat. Symposium on NDT in Aerospace, Fürth / Bavaria, Germany, December 3-5, 2008. Fürth, 2008. P. 1–8.
4. *Gopalakrishnan S., Ruzzene M., Hanagud S*. Computational Techniques for Structural Health Monitoring. L.: Springer-Verlag, 2011. 500 p. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-284-1
5. ГОСТ Р ИСО 13374-1-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Часть 1. Общее руководство. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2011. 18 с.
6. *Bendixen G. E., O'Connell R. F., Siegert C. D.* Digital Active Control System for Load Alleviation for the Lockheed L-1011. Aeronautical Journal. 1981. Vol. 86, No 849. P. 123–130.
7. *Kubica F., Livet T., Le Tron X., Bucharles A*. Parameter-Robust Flight Control System for a Flexible Aircraft. Control Engineering Practice. 1995.Vol. 3, No 9. P. 1209–1215. https://doi.org/10.1016/0967-0661(95)00119-F
8. *Айзенберг Я. Е., Златкин Ю. М., Калногуз А. Н.* Управление по углам атаки и скольжения первых ступеней РН. Космічна наука і технологія. 2002. Т. 8, № 1. С. 61–79. https://doi.org/10.15407/knit2002.01.061
9. *Schmidt H.-J., Schmidt-Brandecker B.* Design Benefits in Aeronautics Resulting from SHM. Encyclopedia of Structural Health Monitoring : Eds.: Christian Boller, Fou-Kuo Chang, Yozo Fujino. Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2009. Vol. 4. P. 1915–1922. https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm142
10. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н.* Упрощенная модель динамики ракеты-носителя с учетом изгибных деформаций корпуса при полёте на активном участке траектории. Техническая механика. 2010. № 2. С. 93–102.
11. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н*. Применение активного управления движением ракеты-носителя с учётом изгибных деформаций корпуса. Техническая механика. 2011. № 4. С. 125–136.
12. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Активное управление возмущённым движением ракеты-носителя на основе данных мониторинга текущего состояния её систем: задачи и перспективы. Техническая механика. 2012. № 1. С. 72–81.
13. Спосіб і пристрій управління збуреним рухом пружно деформованої ракети-носія навколо центру мас : пат. 102987 Україна: МПК B 64 C 13/00. № U201209134; заявл. 25.07.2012; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. 6 с.
14. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Математическая модель упругодеформирующейся в полёте ракеты-носителя. Техническая механика. 2013. № 4. С. 59–70.
15. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Методический подход к формированию активного управления гидродинамической обстановкой в топливных баках ракеты-носителя на основе данных мониторинга ее текущего состояния. Техническая механика. 2015. № 1. С. 30–41.
16. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Особенности формирования алгоритма активного управления содержанием свободных газовых включений на входе в топливные магистрали маршевого двигателя по данным мониторинга текущего состояния гидродинамической обстановки в баках ракеты-носителя. Техническая механика. 2015. № 4. С.103–116.
17. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Активное управление полетом ракеты-носителя: новый подход и рациональные пути его реализации. Техническая механика. 2016. № 2. С. 32–43.
18. *Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф.* Повышение целевой эффективности ракеты космического назначения среднего класса: перспективные направления модернизации. Техническая механика. 2016. № 4. С. 50–61.
19. *Бойкова М. В., Гаврилов С. Д., Гавриличева Н. А.* Авиация будущего. Форсайт. 2009. Т. 1, № 9. С. 5–15.
20. *Крутилин А., Коковин В., Герман Г., Ловчиков С.* Эксплуатация самолета будущего должна начинаться сегодня. Авиапанорама. 2008. № 5. С. 3–8.
21 ГОСТ 27002 – 2015. Надёжность в технике. Термины и определения. М.: Сандартинформ, 2016. 14 с.
22 *Chen J., Patton R. J.* Robust model based fault diagnosis for dynamic systems. Boston: Kluwer academic publishers, 1999. 324 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5149-2_9
23 *Patton R. J., Frank P. M., Clark R. N*. Issues of fault diagnosis for dynamical systems. B.: Springer-Verlag, 2000. 364 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3644-6
24 *Simani S., Fantuzzi C., Patton R. J*. Model-based fault diagnosis in dynamical systems using identification techniques. B.: Springer Verlag, 2002. 480 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3829-7_2
25 *De Persis C., Isidori A*. A geometric approach to nonlinear fault detection and isolation. IEEE Transactions on Automatic Control. 2001. Vol. 45, No 6. P. 101–119. https://doi.org/10.1109/9.928586
26 *Chandler P. R., Pachter M., Mears M.* System identification for adaptive and reconfigurable control. Journal of guidance, control and dynamics. 1995. Vol.18, No 3. P. 32–46. https://doi.org/10.2514/3.21417
27 *Balakrishnan J., Narendra K. S*. Adaptive control using multiple model. IEEE transactions on automatic control. 1997. Vol. 42, No 2. P. 111–120. https://doi.org/10.1109/9.554398
28 *Cieslak R., Desclaux C., Fawaz A., Varaiya P.* Supervisory control of discrete-event processes with partial observations. IEEE Transactions on Automatic Control. 1988. Vol. 33, No 3. P. 249–260. https://doi.org/10.1109/9.402
29 *Brandin B. A., Wonham W. M*. Supervisory control of timed discrete-event systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 1994. Vol. 39, No 2. P. 329–342. https://doi.org/10.1109/9.272327
30 *Cassandras C. G., Lafortune S*. Introduction to discrete event systems. N. Y.: Springer Science + Business Media, 2008. 2nd ed. 770 p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68612-7
31 *Sampath M., Sengupta R., Lafortune S., Sinnamohideen K., Teneketzis D.* Diagnosability of Discrete-Event Systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 1995. Vol. 40, No 9. P. 1555–1575. https://doi.org/10.1109/9.412626

32 *Sampath M., Sengupta R., Lafortune S., Sinnamohideen K., Teneketzis D*. Failure Diagnosis Using Discrete-Event Models. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1996. Vol. 4, No 2. P. 105–124. https://doi.org/10.1109/87.486338

33 *Sampath M., Lafortune S., Teneketzis D*. Active Diagnosis of Discrete-Event Systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 1998. Vol. 43, No 7. 1998. P. 908–929. https://doi.org/10.1109/9.701089

34 *Ramadge P. J., Wonham W. M*. The control of discrete-event systems. Proc. IEEE. 1989. Vol. 77, No 1. P. 81–98. https://doi.org/10.1109/5.21072

35 *Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M*. Diagnosis and fault-tolerant control. N. Y. etc. : Springer-Verlag, 2003. 420 p. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05344-7

36 *Debouk R., Lafortune S., Teneketzis D*. On an optimization problem in sensor selection. International Journal of Control. 2002. Vol. 12, No 4. P. 417–445. https://doi.org/10.1023/A:1019770124060

37 *Горбунцов В. В*. Теоретико-групповой подход к решению комбинаторных задач оптимизации. К. : Наук. думка, 1983. 192 с.

38 *Heidergott B., Olsder G. J., van der Woude J*. Max Plus at Work. Modeling and Analysis of Synchronized Systems: A course on Max-Plus Algebra and Its Applications. Princeton: Princeton University Press, 2006. 232 p. https://doi.org/10.1515/9781400865239

39 *Кривулин Н. К*. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем. Санкт -Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. 256 с.

Получено 22.07.2019,
в окончательном варианте 10.02.2020