



OSTIS-2016

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 004.822

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Юрыгина Ю.С.^{*}, Лахин О.И.^{*}, Донсков А.В.^{**}, Мишурова Н.В.^{**}, Сысоев Д.В.^{**}, Скорюпина Е.Г.^{*}

^{*}ООО «Научно-производственная компания «Разумные решения»

г. Самара, Россия

yurygina@smartsolutions-123.ru

^{**}ОАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева,

г. Королёв, Россия

post@rsce.ru

Рассматриваются методы и средства по созданию системы прогнозирования нештатных ситуаций на борту пилотируемых космических аппаратов. Для решения задач система использует концептуальную и математическую модели космического аппарата. Применение системы поможет специалистам главной оперативной группы управления своевременно обнаруживать отклонения от штатного режима работы и принимать соответствующие меры.

Ключевые слова: концептуальная модель, онтология, мультиагентные технологии, кибер-физическая модель, нештатная ситуация, ПКА «Союз».

Введение

Совершенствование пилотируемых космических аппаратов (ПКА) включает расширение диапазона контролируемых параметров, что увеличивает сложность оперативного контроля состояния и движения ПКА. Аномальное состояние ПКА может возникнуть вследствие длительного медленно протекающего процесса на борту. В таких ситуациях параметры контроля могут находиться в допустимых диапазонах, поэтому распознавание подобных отклонений от нормального состояния тяжело идентифицировать. Для повышения точности определения процессов, происходящих на борту, достоверной оценки будущего состояния ПКА необходимо создание автоматизированной системы оперативного контроля состояния ПКА.

1. Обзор существующих решений

Среди решений в ракетно-космической отрасли, можно выделить интеллектуальную систему, разрабатываемую в Санкт-Петербургском научно-инженерном центре [НИЦ ЭТУ, 2015], которая осуществляет мониторинг и контроль состояния космодронов. В задачи системы входит определение состояния оборудования по показаниям датчиков, прогноз изменения значений параметров для выявления опасных тенденций, предпосылок

развития нештатных ситуаций. В случае обнаружения отклонений в техническом состоянии объекта формируются и выдаются рекомендации для принятия решений. В настоящее время система осуществляет комплексный мониторинг ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры космодрома Плесецк.

В промышленной среде широко используются решения, осуществляющие мониторинг факторов, влияющих на безопасность производства. Наиболее известными являются: ProcessVue Alarm Management Suite компании MAC Solutions, Великобритания [MAC Solutions, 2015], DynAMO Alarm Suite компании Honeywell, США [Honeywell, 2015], Alarm Management System компании Dräger, Германия [Dräger, 2015], Nellcor™ SatSeconds компании Covidien, Ирландия [Covidien, 2015]. Среди недостатков данных систем можно выделить подробное документирование событий, возникающих в системе, что вызывает необходимость хранения большого количества избыточных данных. Обмен информацией осуществляется по единой шине данных, которая в случае возникновения непредвиденной ситуации является потенциальным узким местом системы и др.

Предлагаемый в данной статье подход отличается способом представления модели

сложного технического объекта (ПКА). В отличие от рассмотренных ранее решений, в предлагаемом подходе модель сложного технического объекта описывается при помощи семантической сети (онтологии). Это обеспечивает гибкость и легкость масштабирования системы, не требует перепрограммирования при внесении изменений: добавлении новых технических средств, новых типов нештатных ситуаций, изменении предметной области.

Следующее отличие состоит в методе построения рекомендаций при возникновении нештатных ситуаций. Многие системы работают на основе регламентированных инструкций, внесенных в базу данных. Некоторые системы сохраняют для дальнейшего использования алгоритм решения, информацию о событиях, произошедших на контролируемом объекте. Это ограничивает область решаемых задач кругом ситуаций, имеющихся в базе системы. Данное ограничение устраняется за счет использования мультиагентных технологий, когда на базе имеющихся в системе знаний агент может получить новые знания и построить алгоритм выхода из непредвиденной ситуации. Взаимодействие между агентами децентрализовано, что свидетельствует об отсутствии узких мест в системе.

2. Постановка проблемы

В процессе выполнения основных динамических режимов - выведение, манёвр, сближение и спуск - высока вероятность отказов элементов бортовых систем, последствия которых могут привести к срочному спуску ПКА. Причинами несвоевременного выявления предпосылок возникновения нештатных ситуаций при оперативном управлении могут стать:

- необходимость совершенствования средств контроля и воздействия на ход полета;
- большое количество разнородных знаний;
- необходимость определения гарантированного запаса времени;
- необходимость оперативного принятия решений в условиях ограниченного времени;
- сложность планирования полета.

Основной целью разработки системы является сокращение времени на анализ состояния космического аппарата, причин возникновения аномальных процессов, подготовка рекомендаций по дальнейшей работе космического аппарата. Это предоставит специалистам главной оперативной группы (ГОГУ) Центра управления полетами помощь в систематическом наблюдении, анализе и своевременном принятии решений по предупреждению и парированию нештатных ситуаций.

Основными задачами, которые будет решать автоматизированная система, являются:

- распознавание отклонения от штатного состояния;
- наблюдение тенденции к возникновению нештатной ситуации, распознавание нештатных ситуаций;
- формирование рекомендаций по предотвращению и парированию нештатных ситуаций;
- отслеживание, фиксирование и сохранение выполненных действий по ликвидации нештатных ситуаций (НШС) на основе анализа телеметрической информации, докладов специалистов);
- прогнозирование состояния ПКА на следующем витке или на заданный период при штатной работе;
- анализ риска отказа взаимосвязанных систем при отклонении от штатной работы или тенденции к возникновению нештатной ситуации;
- прогнозирование развития НШС на ближайшие витки;
- моделирование и оценка состояния ПКА в реальном времени.

3. Предлагаемый подход

Для решения поставленных задач система использует концептуальную и математическую модель ПКА. Концептуальная модель отражает физическую, функциональную структуру корабля, штатные и нештатные состояния, правила по предупреждению и парированию нештатных и аварийных ситуаций. При помощи математической модели на основе нечетких множеств выполняется оценка текущего состояния ПКА в условиях постоянного изменения параметров.

Задачи анализа, распознавания и прогноза возникновения нештатных ситуаций, а также формирование рекомендаций по их предупреждению и парированию выполняются мультиагентной системой, которая использует концептуальную и математическую модели для получения данных о состоянии ПКА.

3.1. Концептуальная модель

Основными элементами концептуальной модели являются:

- физическая модель (объекты: «ТПК Союз», «СОЖ», «СОТР», «Гидросистема», «Автоматика СТР», «Средства вентиляции» «Влагосборник», «Блок управления приводом вентилятора» и др.; отношения: «состоит из систем», «состоит из оборудования»);
- модель штатного состояния электроприборов («Штатное состояние уровня влажности для работы электроприборов», «Штатное состояние температуры для работы электроприборов», и др.);
- модель нештатных ситуаций;
- правила по предупреждению и парированию нештатных ситуаций («Откачка

конденсата», «Проверить скафандры и частично разгерметизировать СА», «Досрочный спуск» и др.)

Для распознавания отклонения от штатного состояния используется описание ожидаемых штатных и допустимых диапазонов значений параметров. Следовательно, значения, не входящие в данный диапазон, будут попадать в нештатный диапазон значений.

Используя описания штатных, допустимых и нештатных диапазонов значений показателей телеметрической информации (ТМИ), система должна отслеживать тенденции к выходу из штатного диапазона, а также рассчитывать время достижения нештатных границ (рисунок 1).

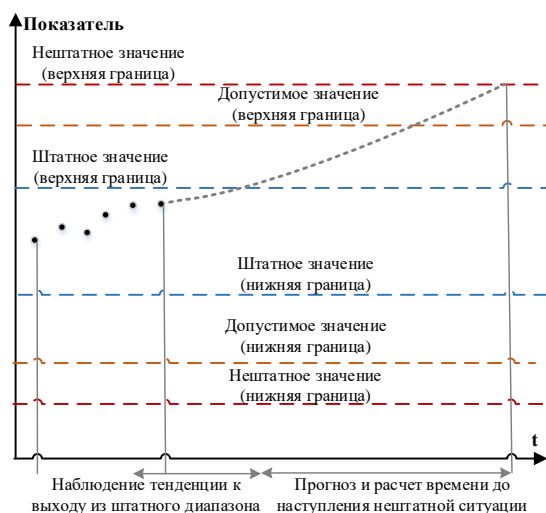


Рисунок 1 – Наблюдение изменения показателя ТМИ

3.2. Математическая модель

Для прогноза состояния космического аппарата может использоваться математическая модель, основанная на применении нечетких множеств. Для этого выделяются основные показатели, определяются диапазоны значений и вычисляются взаимосвязи между различными показателями ТМИ.

В таблице 1 представлены диапазоны значений основных показателей (температура, уровень влажности, временной отрезок с момента доклада экипажа об откачке конденсата, объем конденсата).

Таблица 1 – Диапазоны значений показателей

Лингв. переменная	Лингвистическая шкала	Числовой диапазон
Температура атмосферы внутреннего объема спускаемого аппарата (СА)	Низкая Ниже средней Средняя Выше средней Высокая	10÷13 °С 14÷17 °С 18÷23 °С 24÷27 °С > 28 °С
Уровень влажности во внутреннем	Малый Ниже среднего Средний Выше среднего	0÷2 мм. рт. ст. 3÷7 мм. рт. ст. 8÷11 мм. рт. ст. ст.

объеме СА	Большой	12÷15 мм. рт. ст. > 16 мм. рт. ст.
Временной отрезок с момента доклада экипажа об откачке конденсата	Малый Ниже среднего Средний Выше среднего Большой	0÷0.5 ч 0.5÷2.5 ч 2.5÷3.5 ч 3.5÷5 > 5 ч
Количество конденсата	Малое Ниже среднего Среднее Выше среднего Большое	0÷5 мл 6÷11 мл 12÷17 мл 18÷24 мл > 25 мл

На основе таблицы 1, составляется матрица отношений, при помощи которых определяются зависимости между различными показателями:

$$M_{ij}^1 = \begin{matrix} H \\ HC \\ C \\ BC \\ B \end{matrix} \begin{pmatrix} H & HC & C & BC & B \\ t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} & t_{25} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} & t_{35} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} & t_{45} \\ t_{51} & t_{52} & t_{53} & t_{54} & t_{55} \end{pmatrix}$$

Рисунок 2 – Пример матрицы отношений

Определенные зависимости позволяют составлять прогноз значения показателя, например, количества конденсата (таблица 2).

Таблица 2. Прогнозируемые значения показателя образовавшегося конденсата в зависимости от значений других показателей среды

Температура атмосферы внутреннего объема СА	Уровень влажности во внутреннем объеме СА	Время с момента старта (временной отрезок)	Количество образовавшегося конденсата	
			Лингв. оценка	Числ. диапазон
Н	Н	В	Н	0÷0.5 мл
Н	С	В	НС	6÷11 мл
Н	В	С	НС	
НС	ВС	С	НС	
НС	ВС	С	С	12÷17 мл 18÷24 мл
С	ВС	С	ВС	
С	ВС	НС	ВС	
ВС	В	НС	ВС	
В	ВС	М	В	> 25 мл
В	ВС	В	В	

Отклонение одного показателя может повлиять на ряд связанных систем ПКА, которые могут также выйти из штатного состояния через определенное время. Так, уровень влажности влияет на следующие системы (рисунок 3):

- СОТР (система обеспечения теплового режима);
- СУС (система управления спуском);
- СЭП (система электропитания);
- СОЖ (система обеспечения жизнедеятельности);
- ПК Нептун (пульт космонавтов).

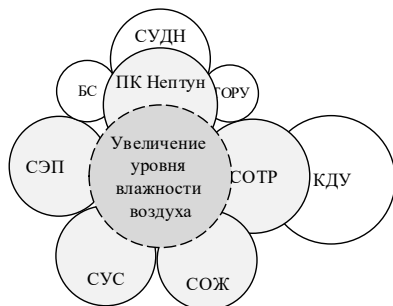


Рисунок 3 – Пример связанных подсистем ПКА

3.3. Кибер-физическая модель

Для упрощения восприятия и анализа текущего состояния ПКА предлагается использовать кибер-физическую модель или 3D модель космического аппарата. Здесь отражается не только физическая структура, но и результаты анализа, выполненного системой: узлы корабля, задействованные в нештатной ситуации, и узлы, находящиеся в зоне риска.

3.4. Мультиагентная модель

Для каждого узла ПКА назначается программный агент [Матюшин и др., 2013]. Агент узла отслеживает показатели среды, влияющие на штатную работу узла. При регистрации динамики, приближающей выход показателя из штатного диапазона, агент узла выполняет расчет располагаемого времени и отправляет сообщения агентам функционально связанных узлов.

Для формирования рекомендаций по нормализации показателей агент узла анализирует правила и процессы, влияющие на изменение показателей, оценивает возможность выполнения действий по запуску данных процессов и формирует рекомендации по выполнению необходимых действий [Вакурина и др., 2014].

4. Основные модули автоматизированной системы

На рисунке 4 представлены основные модули системы в информационном контуре управления космическими аппаратами: модуль анализа ТМИ, модуль прогнозирования, модуль формирования рекомендаций по предотвращению и парированию НШС, модуль моделирования и оценки состояния КА после предполагаемых действий.

В реальном времени на вход модуля анализа ТМИ поступают данные ПКА. Модуль анализа ТМИ регистрирует предпосылки к возникновению НШС, либо отклонения от штатного режима

работы, модуль прогнозирования рассчитывает возможные последствия, модуль моделирования оценивает состояние КА после выполнения рекомендаций, сформированных системой.

Из других систем, входящих в контур управления (например, Автоматизированная система планирования (АСП)), поступают данные о программе полета, зонах видимости и т.д.

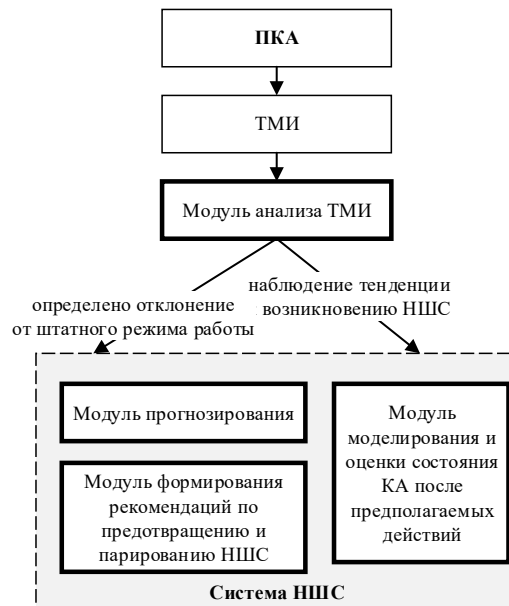


Рисунок 4 – Основные модули системы

Обработанные системой данные поступают специалисту для дальнейшего принятия решений и анализа текущей ситуации. На рисунке 5 приведен общий сценарий работы системы.



Рисунок 5 – Сценарий работы системы

5. Описание примера использования

Рассмотрим основные принципы использования системы на примере возникновения нештатной ситуации останов основного вентилятора В1 холодно-сушильного агрегата– телеметрическое обозначение РВ3, во время автономного полета ПКА «Союз 224» 27 марта 2009 г. Для упрощения и

наглядности в ходе рассмотрения примера некоторые детали были опущены.

5.1. Анализ нештатной ситуации наземными специалистами

По рекомендации ГОГУ экипаж отключает питание вентиляторов В1, В2 и выдаёт команду на включение вентилятора В1. Устойчивой работы вентилятора В1 не зафиксировано. На витке 21 было проведено тестовое включение вентилятора В1 на фоне работающего вентилятора В2. Вентилятор В1 включился, вышел на нормальный режим работы, однако, обороты ротора стали уменьшаться, поэтому экипажу была выдана рекомендация «отключить вентилятор В1».

По возвращении ПКА на Землю специалистами был проведен анализ ситуации для определения причины возникновения НШС. Причиной отказа вентилятора В1 ХСА во время автономного полета ПКА «Союз 224» стало попадание конденсата атмосферной влаги в расточку электродвигателя. Исследование состояния электродвигателя выявило совпадение причины отказа с отказом электродвигателя БК1425 во время полета корабля «Союз 223». Наиболее вероятной причиной попадания конденсата в полости электродвигателя является нерегулярность откачки экипажем конденсата из влагосборника ХСА.

5.2. Сценарий работы системы по предотвращению возникновения НШС

Для предотвращения возникновения НШС система сигнализирует экипажу о необходимости откачки конденсата из влагосборника ХСА. Ожидаемый результат требует выполнения следующих задач:

- фиксирование отклонений от штатного состояния – повышение концентрации влажности;
- прогноз возможных последствий – отказ электрических приборов;
- расчет располагаемого времени – время до отказа электрических приборов;
- формирование рекомендаций по нормализации показателей – уменьшению концентрации влажности;
- формирование рекомендаций по парированию НШС.

Перед началом полета в систему поступают следующие исходные данные:

- текущее состояние ПКА;
- программа полета, сеансы связи.

Во время полета в систему поступает телеметрическая информация, а также доклады экипажа и специалистов. На основании данных система формирует онтологическую модель ситуации, которая позволяет выполнять комплексный контроль состояния КА.

Рассмотрим решение поставленных задач для достижения ожидаемого результата:

- фиксирование отклонений от штатного состояния – повышение уровня влажности.

На основе ТМИ ПКА на витке 19 модуль анализа ТМИ регистрирует изменение параметров:

- температура. Т65, Т66: снижение температуры с 21 до 17 °С в отсеке СА; Т64: стабильное состояние 23-24 °С;
- уровень влажности. УВСА: повышение с 14,3 до 15,9 мм.рт.ст.

Штатный диапазон показателей СОЖ во время режима «маневр»:

- температура в СА: [20, 23] °С;
- уровень влажности: [3, 15] мм.рт.ст.

Штатный диапазон показателей СОТР во время режима «маневр»:

- температура Т65, Т66 [18, 23] °С;
- температура Т64 [20, 23] °С.

Примечание. Системы СОТР и СОЖ имеют дополнительный набор параметров, который для упрощения не рассматривается.

Результат работы модуля анализа ТМИ:

- уровень влажности превысил штатные значения, необходимые для системы СОЖ;
- температура стала ниже штатного значения, необходимого для системы СОТР.

- прогноз возможных последствий – отказ электрических приборов;

Для штатной работы электроприборов параметры температуры и уровня влажности должны лежать в определенных диапазонах. При регистрации тенденции повышения уровня влажности система выполняет прогноз возможных последствий: выход из строя электроприборов, пороговые значения которых могут быть превышены.

На основе данных о штатном режиме работы электродвигателя вентилятора (температура, уровень влажности) модуль прогнозирования устанавливает возможные последствия НШС: выход из строя вентилятора в составе СОТР, используемого для откачки конденсата.

- расчет располагаемого времени – время до отказа электрических приборов;

На основе динамики повышения уровня влажности и пороговых значений штатного функционирования электродвигателя вентилятора система выполняет расчет располагаемого времени до возникновения нештатной ситуации.

- формирование рекомендаций по нормализации показателей – уменьшению концентрации влажности;

Для предотвращения возникновения НШС модуль формирования рекомендаций анализирует правила по предотвращению роста показателей

уровня влажности и требует выполнить откачку конденсата (в результате выполнения операции показатель концентрации влажности снизится). Другой способ нормализации концентрации влажности - «проверка скафандров и частичная разгерметизация СА» указан в системе как крайняя мера предотвращения НШС, поэтому данная рекомендация будет предложена только при отсутствии других возможных способов решения.

Если располагаемого времени не хватит для предотвращения возникновения НШС, система рекомендует продолжение полета с контролем температурно-влажностного режима.

Заключение

Система, разработанная на основе предлагаемого подхода, позволит повысить оперативность реагирования на изменение текущего состояния ПКА, повысит эффективность управления полетом, как в штатном режиме, так и в случае возникновения НШС. Результаты обработки ТМИ поступают специалисту для дальнейшего принятия решений и анализа текущей ситуации, что уменьшает влияние человеческого фактора.

Ожидается получение экономического эффекта за счет снижения рисков отказа ПКА и повышения показателей надежности.

Система поможет специалистам ГОГУ Центра управления полетами решать задачи комплексного контроля и анализа состояния ПКА, а также своевременно принимать решения по предупреждению и парированию нештатных ситуаций.

Библиографический список

[НИЦ ЭТУ, 2015] Научно-инженерный центр электротехнического университета. Интеллектуальные системы мониторинга и контроля состояния технически сложных объектов. <http://www.nicetu.ru/resheniya-i-produkty/intellektualnye-sistemy-monitoringa-i-kontrolja-sostojanija-tehnicheski-slozhnykh-obektov/> (дата обращения: 20.11.2015).

[MAC Solutions, 2015] ProcessVue Suite Overview <http://www.processvue.com/en/products/processvue-suite-overview> (дата обращения: 13.11.2015).

[Honeywell, 2015] HoneyWell Alarm Management. https://www.honeywellprocess.com/en-US/online_campaigns/alarm-management/Pages/alarm-management.html (дата обращения: 13.11.2015).

[Dräger, 2015] Dräger Alarm Management System. http://www.draeger.com/sites/en_seeur/Pages/Applications/Alarm-Management-System.aspx?navID=1877 (дата обращения: 14.11.2015).

[Covidien, 2015] Covidien Nellcor™ SatSeconds. <http://www.covidien.com/rms/clinical-solutions/alarm-management> (дата обращения: 14.11.2015).

[Матюшин и др., 2013] Матюшин М.М., Потоцкий С.И., Скобелев П.О., Потапов В.И., Лахин О.И. Автоматизированная система поддержки принятия решений в аварийных ситуациях // Программные продукты и системы. – 2013. №3.

[Вакурина и др., 2014] Вакурина Т.Г., Матюшин М.М. и др. Интеллектуальная система предупреждения нештатных ситуаций в бортовых системах ТЭК «Прогресс» // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16 – 19 июня 2014 г.: Труды. [Электронный ресурс]. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014.

FEATURES OF REALIZATION OF INTELLIGENT SYSTEM OF ANALYSIS AND FORECASTING OF SPACE VEHICLES

Iurygina I. S., Lakhin O. I., Donskov A.V.,
Mishurova N. V., Sysoev D.V.,
Skoryupina E.G.

Software Engineering Company «Smart Solutions», Samara, Russian Federation

yurygina@smartsolutions-123.ru

OJSC «S. P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev, Russian Federation

post@rsce.ru

The purpose of the study is designing an intelligent system for supporting safety and reliability at the operation stage of a manned space vehicle.

Introduction

Modern space flight control requires quick decision-making based on data analysis, reflecting the current condition of the vehicle. Execution of this laborious task largely depends on the proficiency of the specialist. Existing solutions for managing a complex technical object are limited by their knowledge domain, which prevents them from being used in related fields. The primary objective of the system development is to assist Flight Control Team specialists in monitoring, analyzing and decision-making for quick prevention and elimination of emergencies.

Main Part

A basis for the suggested approach is using multi-agent technologies and semantic networks (ontologies) as well as a conceptual model of a complex technical object's conceptual model and forming a cyber-physical model. Results:

There have been developed a universal solution for designing an intelligent system supporting safety and reliability a manned space vehicle: units of the complex technical object described in the ontology, each subsystem of the object has a correspondent software agent. Agents analyze the system's state based on the model of normal states and emergencies, signal in case of tendency for an emergency occurrence.

Recommendations for an emergency elimination are formed using the emergency elimination rules and the model of physical processes described in the ontology.

Conclusion

Application of the suggested approach will help the Flight Control Team specialists to locate deviations from the normal conditions in time and take appropriate measures. It is expected that the economic benefit will be obtained by reducing risks of failure and improving the object reliability parameters.