



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**Зухба Р.Д., Куракин П.В.,
Малинецкий Г.Г., Махов С.А.,
Митин Н.А., Торопыгина С.А.**

Система моделирования
«КОСКОН» как инструмент
поддержки принятия
решений в космической
отрасли

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Система моделирования «КОСКОН» как инструмент поддержки принятия решений в космической отрасли / Р.Д.Зухба [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 113. 36 с.
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-113>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

**Р.Д. Зухба, П.В. Куракин, Г.Г. Малинецкий, С.А. Махов,
Н.А. Митин, С.А. Торопыгина**

**Система моделирования «КОСКОН»
как инструмент поддержки принятия
решений в космической отрасли**

Москва — 2015

Р.Д. Зухба, П.В. Куракин, Г.Г. Малинецкий, С.А. Махов, Н.А. Митин, С.А. Торопыгина

Система моделирования «КОСКОН» как инструмент поддержки принятия решений в космической отрасли

АННОТАЦИЯ

В работе описан прототип программно-математического комплекса, предназначенного для поддержки принятия решений в космической отрасли. Эта работа была выполнена по инициативе ЦНИИмаш. Комплекс позволяет моделировать баллистические схемы космических полетов, оценивать физическую реализуемость и риски полетов. Описаны архитектура комплекса, устройство пользовательского интерфейса и работа с ним, изложены принципы создания системы расчетов и ряд используемых математических моделей.

Ключевые слова: программные комплексы, трехслойная архитектура, открытый код, веб-технологии, слой веб-интерфейса, вычислительный слой, компьютерное моделирование, вероятностные модели рисков.

R.D. Zukhba, P.V. Kurakin, G.G. Malinetskii, S.A. Makhov, N.A. Mitin, S.A. Toropygina

The simulation system "COSCON" as a tool for decision support in the space industry

ABSTRACT

This paper describes a prototype software and mathematical system, intended for decision support in the space industry. The program complex allows to simulate the ballistic scheme of space flight, to assess the physical feasibility and risk of flight. Describes architecture, device user interface and working with it, the principles of creation of system of calculations and the number of used mathematical models.

Key words: software packages, three-layered architecture, open source, web technologies, web interface layer, calculation layer, computer simulation, probabilistic risk models.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-01-00617-а, 15-01-07944-а, 15-06-07926-а).

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является логическим продолжением работы [1], в которой были изложены принципы организации и функционирования программно-математических комплексов нового поколения, описана ожидаемая область их применения. В частности, указана возможность использования подобных комплексов в системах поддержки принятия решений в космической отрасли на основе моделирования космических экспедиций.

В настоящее время в мире происходят важные перемены в освоении космического пространства. Их суть состоит в том, что три направления космической деятельности – научное, военное и экономическое – начинают развиваться по своим траекториям. При этом критерии эффективности для каждой из этих сфер существенно отличаются.

В теории инновационного развития рассматриваются инфратраектории – зависимости доли «экологической ниши», занятой определенной технологией, от времени. В соответствии с теорией выдающегося русского экономиста Н.Д. Кондратьева, войны, революции, кризисы определяются большими волнами технологического развития. Исходя из этой картины, экономическую динамику диктует смена одних технологических укладов другими. Рисунок 1 иллюстрирует эту картину.

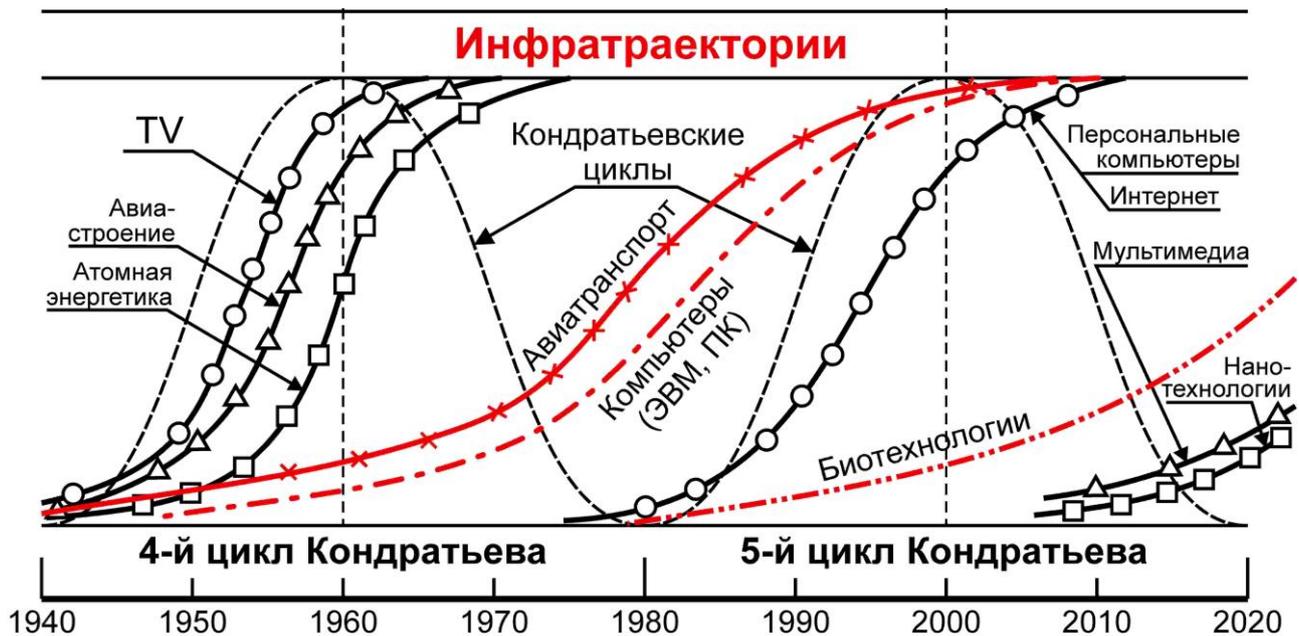


Рисунок 1. Инфратраектории кондратьевских циклов.

На ранней стадии развития большинства технологий ведущая роль принадлежит государству. На наиболее крутом участке S-образной траектории к нему подключается негосударственный сектор, а затем вся отрасль экономики переходит в руки бизнеса. На первом этапе ключевую роль играют базисные инновации, которые и определяют вектор развития будущей отрасли, на последнем — улучшающие инновации, направленные на повышение эффективности всей деятельности в сравнении с другими сферами экономики. На первом этапе речь идет о демонстрации технических возможностей данного вида деятельности, на последнем — решающими становятся надёжность, долговечность, стоимость и другие «экономические характеристики».

Возможности космических технологий были продемонстрированы в 1960-х годах. В силу высокой стоимости космической деятельности её основным «продуктом» сегодня является информация. Связь, навигация, дистанционное зондирование, мониторинг. Это показывает и «экономическая история» космической отрасли, продемонстрированная на рисунке 2.

Видно, что основная доля рынка приходится на информацию, получаемую из космоса, и наземные средства, позволяющие использовать эту информацию. Россия в настоящее время является лидирующей отраслью по доставке грузов в космос (это дает примерно 130 млрд. рублей за год). Однако сам этот сектор составляет только 1% космической экономики. Поэтому будущее российского космоса во многом зависит от того, насколько эффективно удастся использовать имеющиеся в настоящее время преимущества и заделы и войти на мировой рынок, связанный с использованием космической информации – в частности, спутникового телевидения и навигационных услуг.

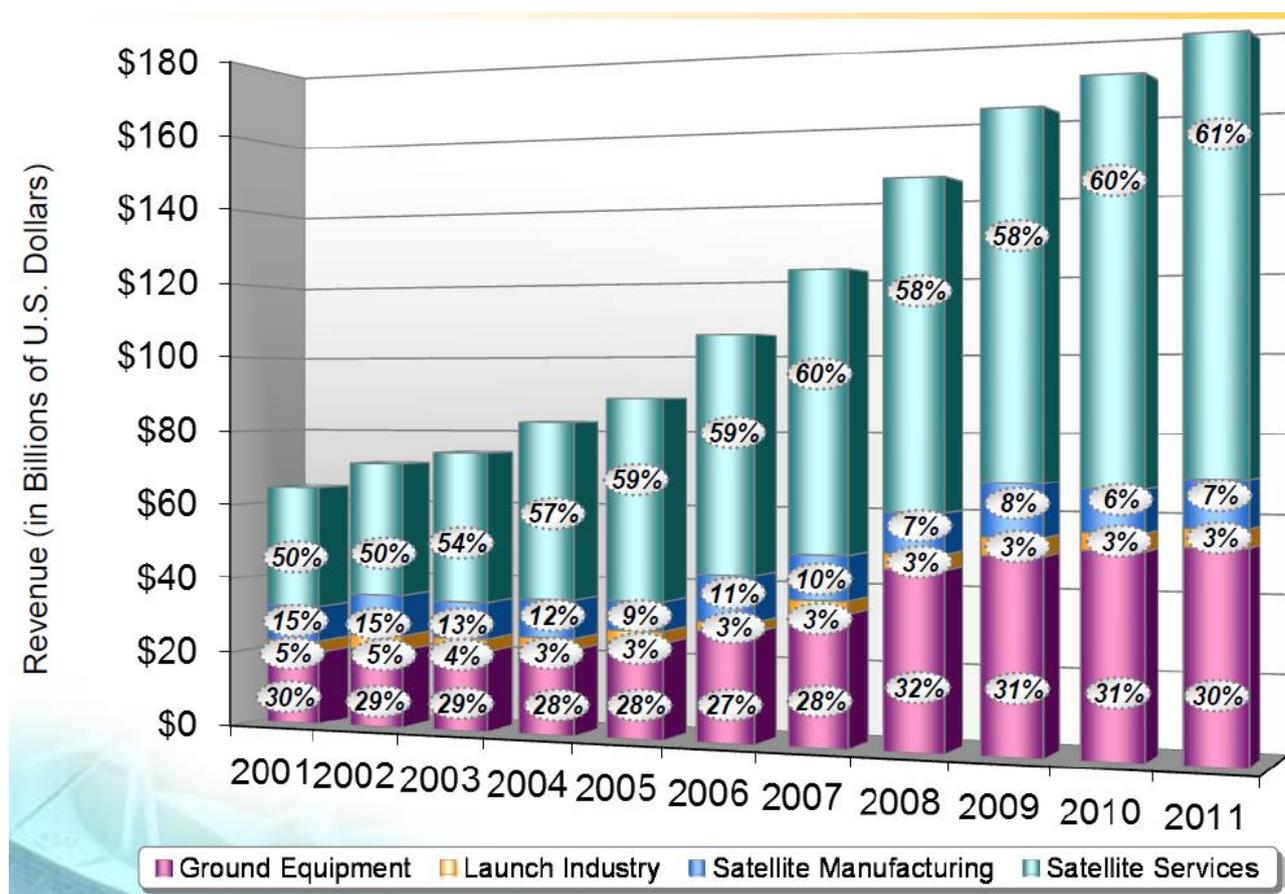


Рисунок 2. Выручка мировой спутниковой индустрии по сегментам (Futron Corporation - State of the Satellite Industry, Report 2012).

Вероятно, космическая отрасль находится на втором этапе своего развития, связанном с быстрым ростом. Признаки этого – не только быстрый рост объемов рынка, но и то, что сейчас в мире только треть вложений приходится на государственный сектор. Остальное – инвестиции в коммерческое освоение космического пространства.

В этой быстро растущей области и стремительно меняющейся технологической, экономической, геополитической ситуации очень важно, чтобы все субъекты космической деятельности говорили на одном языке. Основой этого языка может стать программная система, создаваемая в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша (ИПМ) – Космический конструктор (КОСКОН).

Ответ на вопросы, зачем нужен этот инструмент, как он может использоваться и каковы направления его дальнейшего развития можно сформулировать в виде нескольких тезисов.

КОСКОН является инструментом системной интеграции результатов участников космической деятельности России. Для крупных научно-технических проектов характерно участие множества субъектов и агентов. Результаты выполненных научно-исследовательских работ, новые технологии, уже имеющиеся средства, финансовые потоки и перспективу приходится рассматривать в едином комплексе. Именно поэтому вопросы взаимодействия, интеграции коллективных усилий зачастую имеют решающее значение.

Опыт участия ИПМ в реализации советских космических и ядерных проектов, в создании системы «Энергия-Буран» показал, что исключительно важной частью разработки проекта является предварительная научная, технологическая, системная оценка будущего изделия. Инструментом для получения такой оценки является система математических моделей. Именно она позволяет увязать воедино уже созданное, объективно оценить роль, значение, уровень различных систем, разработок и технологий, увидеть наиболее важные проблемы и выбрать наилучшее решение.

В начале советской космической программы эту координирующую роль взял на себя Совет главных конструкторов – неформальная организация, возглавлявшаяся академиком С.П. Королёвым. Это дало свои выдающиеся результаты. Именно для обеспечения космических программ была создана отрасль, выпускающая вычислительную технику. (В отличие от других масштабных проектов, считать здесь надо было не только очень много, но и очень быстро, что потребовало создания компьютеров).

Однако по мере развития космической отрасли возникла необходимость сопоставлять, при необходимости менять или гибко корректировать программы космических миссий, используемые средства и оценивать те или иные решения технологии и разработки по их вкладу в желаемый результат. КОСКОН предназначен именно для этого. Заметим, что соответствующие «стандартные» программные комплексы на определенной стадии развития существуют и в других отраслях, относящихся к IV и V технологическим укладам – в самолетостроении, микроэлектронике, фармацевтике и т.д.

КОСКОН представляет простейший «язык», на котором могут общаться разработчики различных систем и космических программ. С 1980-х годов активно развиваются и всё шире используются междисциплинарные подходы. Всё чаще сложные проекты требуют «сборки» результатов, технологий, подходов, относящихся к разным научным дисциплинам, отраслям промышленности и компаниям-разработчикам. Языком междисциплинарного общения всё чаще становятся математические модели.

Естественно строить язык «сверху-вниз», определяя наиболее важные, одинаково понимаемые сущности. В данном случае это *техническая реализуемость* – выполнение необходимых условий для того, чтобы космический аппарат с необходимым запасом топлива оказался в заданных точках пространства; *надежность* – оцениваемая по вероятности отказа основных систем корабля; *стоимость миссии*. Опыт проектирования технических систем показывает, что на каждом иерархическом уровне

разработчик может обоснованно и компетентно определить не более 5-7 параметров будущего изделия. Эти требования, как правило, противоречивы.

Например, можно создавать дорогие долговечные конструкции, а можно ориентироваться на меньший срок использования, компенсируя это дешевизной и количеством запускаемых объектов. При этом на начальном уровне методики определения ключевых сущностей должны быть как можно проще, наглядней и очевидней.

Обычно языки отличаются, прежде всего, по числу людей, которые на них говорят. Если КОСКОН станет широко использоваться в космической отрасли, то это намного упростит взаимодействие и сделает анализ конкретных проектов более простым, ясным и наглядным. При этом на начальном этапе достоинством математических моделей, используемых в КОСКОНе, является их простота и очевидность. По сути, должен быть сделан только один шаг вперед по отношению к обычным инженерным прикидкам. По мере распространения системы к ней могут быть «пристыкованы» более сложные и точные модели баллистики и оценки вероятности нештатных ситуаций. Тем не менее простые модели должны давать информацию об осуществимости проекта в наиболее благоприятной ситуации, более сложные – применяться, когда ясна осуществимость проекта и нужно учитывать осложняющие факторы. Естественно, детальные расчеты отдельных систем и всего комплекса выходят за рамки КОСКОНа и должны проводиться при детальной проработке всех этапов и элементов миссии.

КОСКОН позволяет более эффективно организовать отбор проектов в быстро меняющихся условиях. Приоритеты Роскосмоса существенно меняются на протяжении нескольких лет. Например, в 2015 году было объявлено о сдвиге срока «лунной программы» России, которая ещё недавно рассматривалась как главный приоритет. Сейчас стратегический приоритет не выбран и рассматриваются проекты участия нашей страны в марсианской и лунной программах, в миссии на Меркурий в рамках международного проекта «Бени-

Коломбо», имеет место военная программа освоения космического пространства в военных целях. КОСКОН позволяет достаточно легко и наглядно представлять все эти проекты в пространстве возможных вариантов, чтобы с системной точки зрения оценить достоинства и недостатки того или иного стратегического выбора и коридор возможностей, в котором может развиваться российская программа освоения космоса в течение ближайших десятилетий.

В настоящее время Россия столкнулась с необходимостью по экономическим соображениям корректировать свои космические программы, отказываясь от второстепенного и сосредотачиваясь на главном. КОСКОН может стать инструментом, позволяющим просто и наглядно представлять экономическую составляющую космической деятельности.

В 2015 году было объявлено уже о третьем за год сокращении планов Роскосмоса. Если в начале 2015 года программа развития космической отрасли до 2020 года предполагала расходы в 2,7 трлн. рублей, то сегодня они могут быть сокращены до 2 трлн. При этом успешность запусков, управление риском катастроф космических средств имеют экономическое измерение – выводимые на орбиту спутники начинают страховать под более высокие проценты. И в этой связи КОСКОН представляет сейчас и ещё в большей степени в будущем возможность наглядно представлять «космическую экономику» и отдельных миссий, и их совокупности.

В настоящее время возник набор новых нестандартных задач, в анализе и планировании которых нет достаточного опыта, *и в этом контексте система КОСКОН могла бы быть очень полезной для первоначальной оценки таких программ.* Компания Илона Маска Space X и ряд других фирм активно начали программы, в которых на Землю для повторного использования возвращается не только головная часть запускаемого аппарата, но и ракетные двигатели первой ступени – достаточно дорогое и сложное оборудование. И хотя в настоящее время эта технология представляется весьма ненадёжной, в будущем

она обещает радикальное снижение стоимости космических запусков, а значит, расширение спектра экономического использования космического пространства и, возможно, космического туризма. В России также разрабатывались и разрабатываются подобные системы (в частности, аппарат «Байкал», проект «Россиянка» и другие). Эти космические средства также естественно рассматривать в рамках проекта КОСКОН.

КОСКОН представляет собой открытую, расширяемую систему, эффективность которой будет тем выше, чем шире её использовать. Каждый запуск и каждая нештатная ситуация может и должна «учить» систему. В частности, очень существенным было бы использование и пополнение этой части статистики. Во-первых, она позволяла бы уточнить вероятности отказа отдельных систем. Во-вторых, это помогло бы более реалистично оценить закон изменения вероятностей нештатных ситуаций в зависимости от времени. В-третьих, в современной теории управления риском отказов технических систем показывается, что очень большую роль играют синергетические эффекты (отказ одного блока или системы меняет надёжность остальных, именно с этим связан «эффект домино», реализующийся в ходе ряда аварий сложных технических систем). Однако оценка синергетических эффектов требует достаточно большой статистики, позволяющей установить коэффициенты в соответствующих моделях. В-четвертых, статистика позволяет уточнить дерево отказов создаваемого изделия.

КОСКОН построен просто и снабжен детальным руководством. Это позволяет заинтересованным лицам использовать и модифицировать его самостоятельно (в той же парадигме, в которой развивается свободное программное обеспечение) при минимальной, в случае необходимости, поддержке разработчиков. Это создает предпосылки для весьма широкого распространения такой системы.

В ближайшее время представляется целесообразным организовать достаточно широкую опытную эксплуатацию системы КОСКОН и её развитие в представленных выше направлениях.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КОСКОН»

Описание архитектуры ПМК «КОСКОН»

ПМК опирается на трехслойную архитектуру, «слой пользовательского интерфейса + слой посредник + вычислительный слой», что схематично изображено на рисунке 3. Основой для такого решения является необходимость связать среду графического редактирования конфигураций задач и вычислительные средства на основе свободно распространяемых программных платформ и решений.

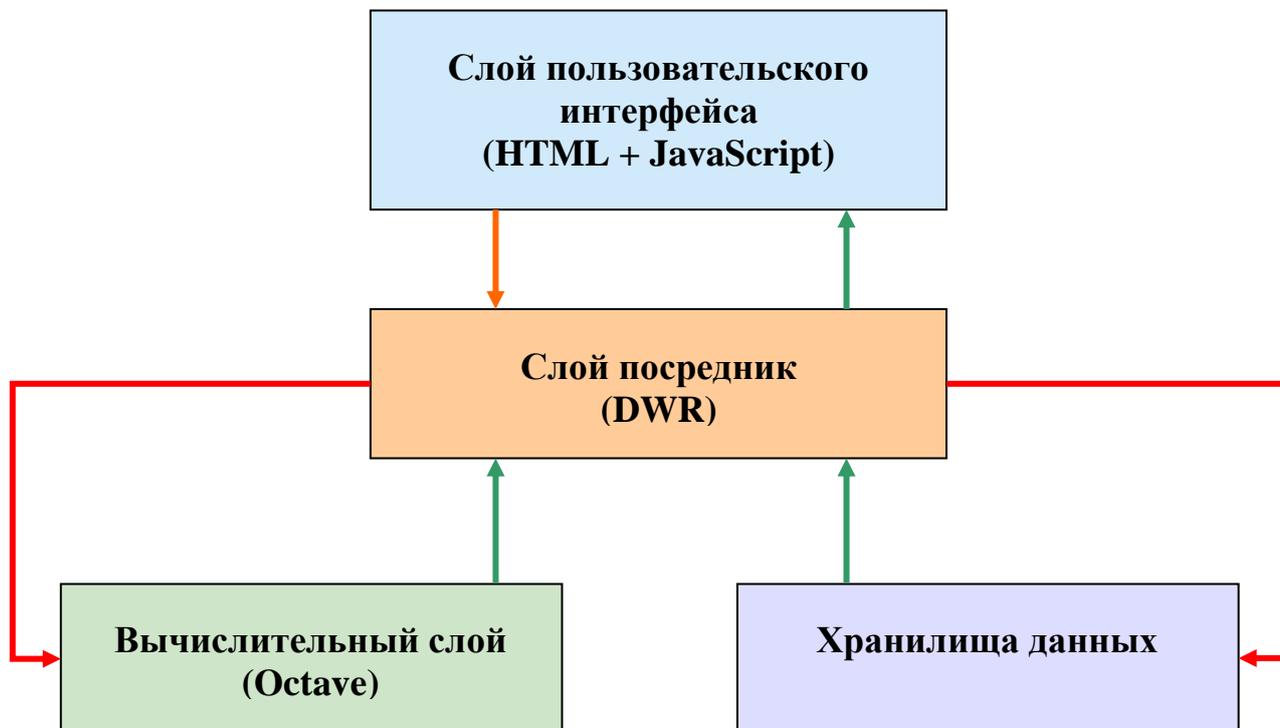


Рисунок 3. Архитектура программно-математического комплекса.

Интерфейс пользователя представляет собой определенный графический редактор, действующий в среде веб-браузера, он разработан

на основе специальной библиотеки открытого кода Yahoo UI (версия 2.9.0), написанной на языке исполнения сценариев веб-браузеров JavaScript. Вычислительный слой представляет собой свободно распространяемое ПО математических расчетов Octave (версия 3.6.4_gcc4.6.2). Данное ПО является популярным бесплатным аналогом наиболее мощного и известного коммерческого пакета MATLAB.

Связь между интерфейсным и вычислительным слоем осуществляет слой-посредник. Фактически, выбор веб-браузера и языка программирования JavaScript в качестве платформы для создания графического редактора интерфейса пользователя predeterminedил выбор ПО для посреднического слоя – это свободно распространяемое ПО Apache Tomcat (версия 6.0.33), представляющее собой сервер веб-приложений, а также набор сопутствующих программных объектов и решений. Apache Tomcat работает на основе платформы Java (версия 7.35 для 32 – разрядных ОС). ПМК использует бесплатную библиотеку DWR (Direct Web Remoting, версия 3.0) для автоматизированного создания так называемого сервлетного (от servlet – это специализированный Java-класс для обработки стандартных команд-запросов в протоколе HTTP) приложения на веб-сервере Apache Tomcat.

Конфигурация задачи, решаемой пользователем, в среде браузера преобразуется из графического представления в текстовое представление в формате JSON [2] средствами языка JavaScript и библиотеки Yahoo UI. Эти строки передаются в качестве аргументов в вызовы определенных JavaScript-методов. Далее, указанное выше сервлетное приложение, созданное на основе технологии DWR, преобразует вызовы методов на языке JavaScript, происходящие в среде веб-браузера, в вызовы Java – классов, установленных в указанном сервлетном приложении, на стороне веб-сервера. Таким образом, удастся передать конфигурацию задачи, созданную в слое графического интерфейса пользователя, к

вычислительному слою (то есть указанные классы иницируют). Помимо непосредственно конфигурации задачи, созданной пользователем, в формате JSON оформлены все служебные файлы ПМК.

Слой посредник реализован не на одной, а на двух языковых платформах: Java и Python. Это сделано для большей гибкости в разработке приложения. Часть программного кода слоя-посредника, написанная на языке Java, является фиксированной. При этом Java-код вызывает интерпретатор Python, а уже методы, реализованные на Python, вызывают на исполнение вычисления пакетом Octave, а также выполняют другие служебные задачи. Программный код на Python позволяет проводить более оперативную модификацию, чем на языке Java, и не требует компиляции перед использованием. В текущей версии программный код, созданный на языке пакета MATLAB (он совпадает с языком Octave), в состоянии преобразовать полученную JSON-строку в структуры данных Octave, чтобы начать вычисления.

Результаты вычислений преобразуются в обратную сторону – из структур данных Octave в JSON-строку, и сохраняются в соответствующем файле конфигурации задачи.

Цикл работы пользователя с ПМК и конфигурация задачи

Цикл работы пользователя с ПМК состоит из следующих шагов.

1. Пользователь создает конфигурацию задачи, пользуясь графическим интерфейсом. Эта конфигурация и результаты расчетов на ее основе сохраняются соответствующем разделе хранилища данных (<tomcat>/webapps/cniimash2015/storage/problems) ПМК в виде пяти файлов:

- `problem_name.problem`; этот файл содержит описание задачи как последовательности космических операций в формате JSON; файл можно редактировать в JSON-редакторах;

- `problem_name.comment`; этот файл содержит комментарий к задаче, его создает сам пользователь;
- `problem_name.gui`; этот файл содержит JSON-описание графической информации для отрисовки конфигурации в среде браузера; пользователь не управляет этим файлом, он создается автоматически;
- `problem_name.report`; этот файл также не управляется пользователем – его автоматически создает вычислительный слой по результатам вычислений (обработки) задачи, описанной в `problem_name.comment`, он содержит краткое резюме результатов расчетов;
- `problem_name.octave`; этот файл содержит полную трассировку работы вычислительного алгоритма; текст из файла `problem_name.report` также входит в этот файл, разница в том, что отчет доступен к просмотру средствами графического интерфейса; в отличие от всех предыдущих файлов, данный файл не является JSON-документом.

2. Пользователь сохраняет конфигурацию, он может неоднократно возвращаться к ее редактированию. Конфигурация состоит из объектов всего двух типов: события и операции. События отображаются прямоугольниками, операции – отрезками. Событие является составным объектом, его формируют два ключевых набора данных: полетная точка (описывает пространственное положение условно между двумя полетными операциями) и связка (описывает технический состав космических средств и модулей, имеющих в начале очередной полетной операции).

3. Каждый объект, будь то событие или операция, имеет набор параметров. Часть из них описывает существо проводимых расчетов, другая часть необходима для управления вычислениями. Все они могут

быть как доступны, так и недоступны пользователю для просмотра и редактирования.

4. Два параметра объектов типа «операция» имеют ключевое значение для управления вычислениями: «ready» и «processed». Флаг «ready» может принимать значения «0» или «1» и означает меру готовности операции (всего набора редактируемых параметров) для проведения вычислений. Флаг «processed» также может принимать значения «0» или «1» и означает, обработана ли данная операция вычислительным алгоритмом. Оба параметра доступны редактированию пользователем, а флаг «processed», помимо этого, переключается в «1» самим вычислительным алгоритмом.

5. После проведения расчетов пользователь может снова загрузить конфигурацию. При этом, в зависимости от расстановки флагов перед отправкой на вычисления, все или только часть операций могут быть обработаны. После этого можно продолжить редактирование конфигурации и повторить цикл работы с задачей. Задача может быть подвергнута обработке (расчету) итеративно.

Файловая структура приложения, хранилище данных и формат рабочих файлов

ПМК имеет файловую структуру, типичную для веб-приложения. Корневой каталог приложения `cniimash2015` располагается в каталоге `<tomcat>/webapps`.

С точки зрения функциональности ПМК наиболее существенным является каталог `cniimash2015/storage`, который представляет собой хранилище данных приложения. Этот каталог имеет следующие подкаталоги:

- Algorithms – содержит вычислительные алгоритмы на языке Octave\Matlab;

- Boardsystems – содержит текстовые файлы в формате JSON с описаниями бортовых систем, предполагаемых для использования в моделируемых полетных миссиях;
- Flightpoints – содержит JSON-описания возможных типов полетных точек;
- Operations – содержит JSON-описания возможных типов полетных операций;
- Problems – содержит созданные пользователем конфигурации задач;
- Spacemodules – содержит используемые в полетных миссиях типы модулей, из которых формируются космические средства.
- System – содержит специальные служебные файлы ПМК с таблицами, в которых описывается рекомендуемая последовательность полетных операций и событий.

ПМК содержит начальное заполнение хранилища с образцами конфигураций задач. Однако идеология ПМК состоит в том, что это открытая система и пользователь может изучить принципы формирования данных в хранилище и наполнять его собственными данными. Таким образом, не только файлы конфигураций задач моделирования, но и все служебные файлы, а также файлы хранилища данных создаются в формате универсального языка разметки данных JSON.

Выбор этого формата данных не случаен. По существу, все определяется первоначальным выбором, сделанным при разработке ПМК. Данный программный комплекс – это веб-приложение, что обусловлено необходимостью использовать готовые и бесплатные прикладные программные библиотеки и пакеты для создания графического редактора и проведения математических расчетов с использованием предположительно различных методов вычислительной математики.

Данные передаются между слоями приложения как строка по протоколу HTTP через сетевую карту – даже с учетом того, что ПМК задуман как локальное приложение, хотя возможен и удаленный режим работы через Интернет или Интранет предприятия. Язык разметки данных JSON идеально предназначен именно для этой цели. Также данные, описанные в формате JSON программными средствами интерфейса, легко преобразуются в структуру дерева, что было широко использовано при построении пользовательского интерфейса.

ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Общие сведения о графическом интерфейсе

Графический интерфейс реализован как «тонкий клиент» в среде веб-браузера. Его функциональное назначение – представить космическую миссию в виде диаграммы, состоящей из блоков и переходов между ними. Интерфейс упрощает пользователю работу с сущностями моделирования, загрузку и решение задач. Также интерфейс позволяет редактировать отдельные файлы из хранилища данных.

Пользовательский интерфейс программного комплекса реализован в виде веб-страницы, общий вид представлен на рисунке 4.

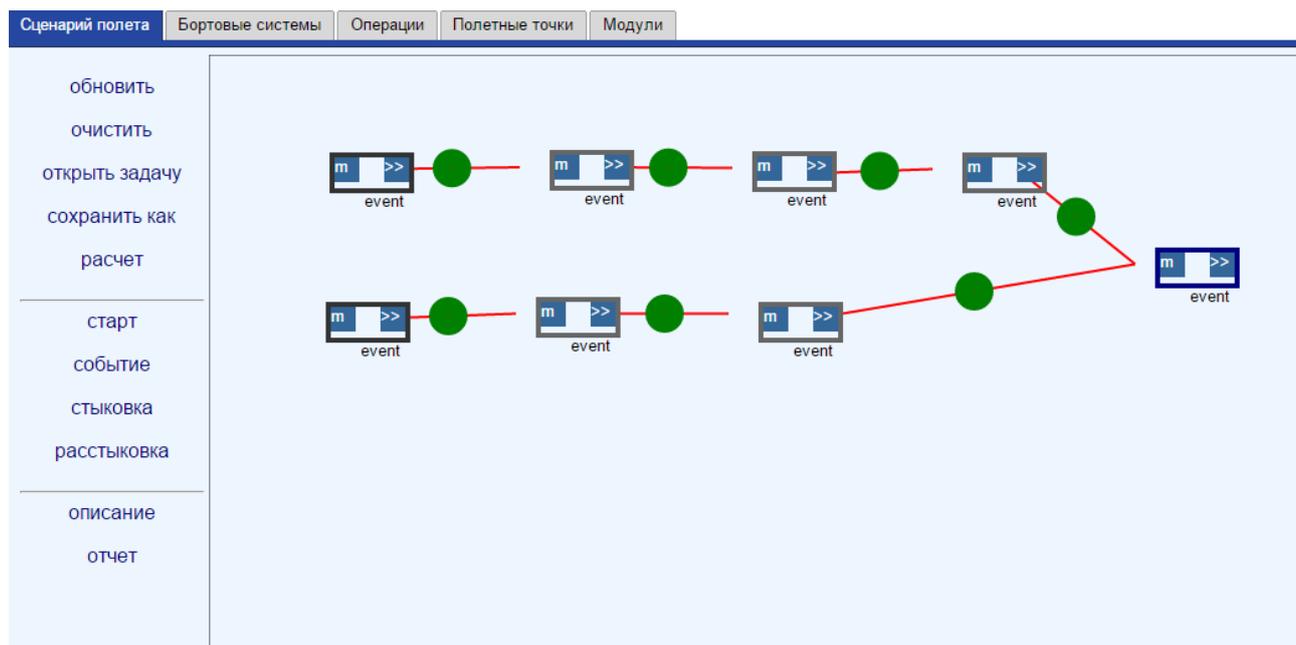


Рисунок 4. Графический интерфейс ПМК. Закладка «Сценарий полета».

Основными графическими элементами диаграммы космического полета являются события и операции. События на диаграмме изображаются в виде прямоугольников. Цвет границы зависит от функционального типа события. Операции на диаграмме изображаются линиями с зеленым кругом.

Пользователю доступны следующие закладки:

- «Сценарий полета»;
- «Бортовые системы»;
- «Операции»;
- «Полетные точки»;
- «Модули»;
- Таблицы.

Закладка «Сценарий полета» – основная закладка – позволяет создавать и редактировать описание сценария всего полета в виде совокупности графических объектов двух видов: *событий* и связывающих их *операций*.

Остальные закладки – вспомогательные, предназначены для редактирования параметров сущностей и неграфических элементов сценария полета.

Редактирование параметров неграфических элементов

Для удобства представления данных и их редактирования все окна, связанные с отображением и изменением параметров, используют структуру деревьев. Родительскими узлами выступают либо папки файловой системы, либо элементы структуры JSON-фалов.

Для того чтобы дерево отобразилось на закладке, необходимо выбрать команду «Обновить данные». Для того чтобы отредактировать параметр, необходимо выбрать в дереве название сущности. На закладке появится окно редактирования и команда «Сохранить». После того как значение параметра будет отредактировано, необходимо выполнить команду «Сохранить». Изменения будут записаны в соответствующий файл. Особенности построения закладок для редактирования неграфических элементов показаны на рисунке 5.

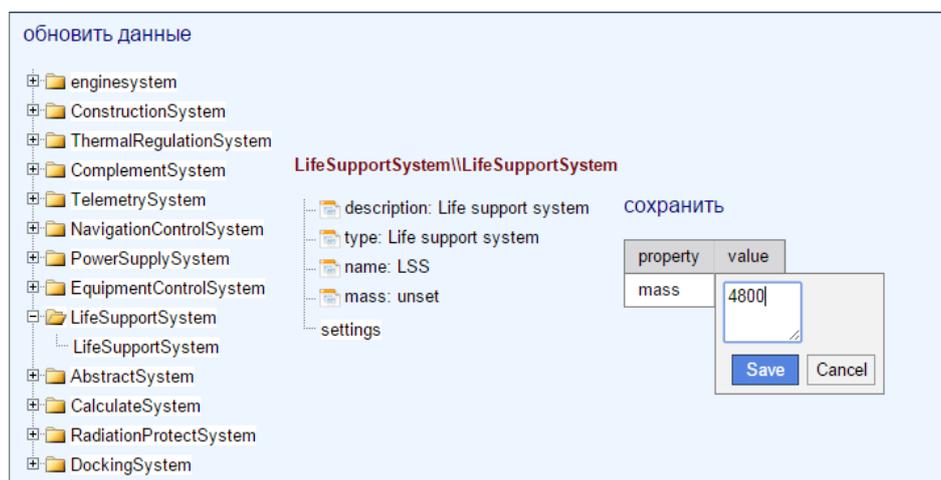


Рисунок 5. Редактор параметров бортовых систем.

Редактирование графических элементов

Закладка «Сценарий полета» включает в себя поле холста для размещения графических элементов конфигурации полета и меню редактора.

Меню редактора содержит следующие команды.

«Обновить» – заново считывает все данные из служебных файлов.

«Очистить» – очищает графическую область создания конфигурации.

«Открыть задачу» – выводит диалоговое окно для выбора имени файла ранее созданной конфигурации.

«Сохранить как» – выводит диалоговое окно для выбора пути сохранения файла текущей (отображаемой на холсте) конфигурации и окно для редактирования комментария конфигурации.

«Расчет» – выполняет расчет для готовых элементов текущей конфигурации. Перед выполнением расчета конфигурация задачи должна быть обязательно сохранена.

«Отчет» – выводит на экран окно с результатами вычислений.

Расчет

Когда конфигурация задачи отображена на холсте и заданы все необходимые для расчета параметры событий и операций, можно произвести расчет конфигурации. Для этого необходимо выбрать в меню команду «Расчет». Вычислительный слой произведет необходимые вычисления и запишет результаты в файлы:

- myConfiguration.report – краткий отчет о результатах расчета;
- myConfiguration.problem – при этом будут изменены значения вычисляемых параметров;
- myConfiguration.octave – полная трассировка выполнения вычислений.

Формирование отчета

Отчет о процессе и результатах вычислений хранится в файле с расширением «.report». Просмотреть отчет можно, выполнив команду «Отчет» в меню графического редактора, появится окно, как на рисунке 6.

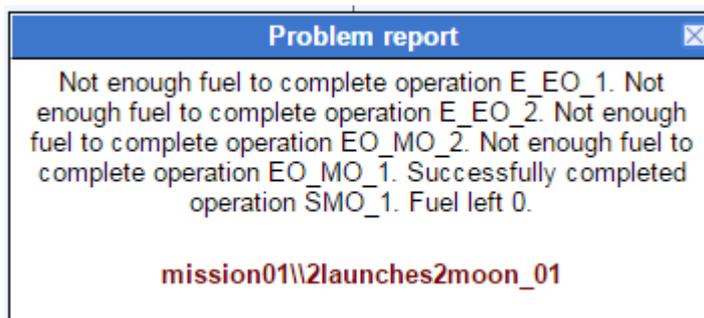


Рисунок 6. Пример отчета о вычислениях.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СЛОЙ

Вычислительная подсистема, иначе – вычислительный слой программного комплекса, представляет собой совокупность вычислительного программного средства и вычислительных алгоритмов.

В качестве программного средства используется свободная система математических вычислений Octave (бесплатный аналог коммерческого продукта MATLAB). Octave представляет собой интерактивный командный интерфейс для решения линейных и нелинейных математических задач, а также проведения других численных экспериментов [3]. Кроме того, Octave можно использовать для пакетной обработки. Язык Octave оперирует арифметикой вещественных и комплексных скаляров и матриц, имеет расширения для решения линейных алгебраических задач, нахождения корней систем нелинейных алгебраических уравнений, работы с полиномами, решения различных дифференциальных уравнений, интегрирования систем дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений первого порядка, интегрирования функций на конечных и бесконечных интервалах. Для работы ПМК необходимо установить Octave на персональный компьютер.

Вычислительный алгоритм представляет собой m-функцию – специализированный файл на языке Octave. Сами алгоритмы

располагаются в каталоге «Algorithms», находящемся в хранилище данных (папка «Storage»).

Задача на выполнение математических расчетов вызывается как отдельный процесс Octave на веб-сервере. Вызов осуществляется из запускающего m-файла. Этот файл представляет собой скрипт, написанный на языке Octave, который сначала запускает приложение Octave, а затем вычислительные алгоритмы, представленные в виде m-функций на языке Octave. Вызов m-функций со стороны веб-сервера осуществляется средствами библиотеки DWR.

Используемые в вычислительном слое алгоритмы позволяют оценивать и сравнивать между собой различные схемы космических полетов по ресурсным затратам и рискам. В частности, для каждой полетной схемы вычисляются следующие обобщенные показатели:

- суммарные затраты характеристических скоростей на всех этапах полета;
- необходимые для маневров массы топлива;
- вероятности успешного выполнения текущих полетных операций и полета в целом.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ПМК

Оценка реализуемости космических полетов

При расчете скоростей и масс топлива используются массово-энергетические модели невозмущенного движения центра масс космического аппарата (КА). Для прикидочных оценок достаточно формулы Циолковского, применяемой для некоторого участка полета:

$$\frac{M_i}{M_f} = \exp\left(\frac{V_f - V_i}{I_{y\delta}}\right). \quad (1)$$

Здесь M_i – масса КА в начальный момент времени, M_f – масса КА в конечный момент времени, V_i – характеристическая скорость КА в начальный момент времени, V_f – характеристическая скорость КА в конечный момент времени, $I_{уд}$ – удельный импульс тяги (скорость истечения газов двигателя).

Дальнейшая схема расчетов хорошо известна: нужно разложить схему полета на составляющие участки, оценить изменение характеристических скоростей на каждом из участков, после чего с помощью формулы Циолковского оценить отношение массы требуемого топлива к массе полезной нагрузки.

После того, как все массы определены, можно составить общий массовый баланс на всех участках для расчета требуемой грузоподъемности используемых в данной полетной схеме ракет-носителей. Это позволяет оценить физическую и (отдельно) техническую реализуемость полета имеющимися техническими средствами и определить необходимость в разработке новых технических средств.

Оценка рисков космических полетов: идеи и подходы

В ходе выполнения работы рассматривались два основных подхода к понятию риска космических миссий:

- вероятностный подход;
- сценарный подход.

В вероятностном подходе основное внимание уделяется расчету вероятностей некоторых критических событий, например, успех или неуспех миссии, в зависимости от вероятностно-статистических законов отказов и выхода из строя бортового оборудования, то есть, в зависимости от надежности последнего [5, 6, 7].

Сценарный подход сосредотачивается на проигрывании возможных нештатных ситуаций и их последствий, чтобы определить окно возможностей по дальнейшему выполнению или прерыванию миссии [4, 8].

Рассмотрим подходы более подробно.

Все причины критических событий или нештатных ситуаций во время полета, влияющих на общий успех миссии, можно разбить на три большие группы [8]:

- 1) внешние причины при взаимодействии с внешним пространством: столкновение с космическим объектом, повышенный уровень радиации;
- 2) внутренние причины: технические неисправности, отказы бортового оборудования, ошибки в программном обеспечении;
- 3) человеческий фактор: заболевание или травма членов экипажа, ошибки со стороны наземного персонала управления или экипажа.

Последствия, вызываемые нештатными ситуациями, при отсутствии или неэффективности ее парирования, могут носить следующий характер:

- полная или частичная утрата работоспособности КА;
- утрата каких-либо функций КА;
- невозможность проведения запланированных полетных операций;
- срыв выполняемой операции;
- невозможность следования КА по требуемой орбите;
- нарушение условий, необходимых для нормальной работы бортовых систем, влекущее новые нештатные ситуации, связанные с отказами бортовых систем, например: недопустимое повышение или понижение температуры или давления в отсеках с приборами, падение напряжения в электросети и т. п.;
- снижение эксплуатационных характеристик КА;
- перерасход или полная утрата ресурсов КА (топлива ДУ, воды, пищи, средств жизнедеятельности, допустимой длительности работы систем);
- снижение уровня безопасности экипажа пилотируемого КА, угроза его здоровью, в том числе нарушение нормальных условий существования

экипажа, приводящее к дискомфорту, снижению работоспособности, заболеванию или гибели;

- ущерб для здоровья экипажа;
- катастрофа, влекущая за собой гибель экипажа, гибель КА.

Среди всех таких последствий следует выделить наиболее значимые события, приводящие к провалу космической миссии. Таким образом, получится соответствие между отказами оборудования и неуспехом (провалом) всей миссии. Если известны вероятностные показатели отказов (закон распределения) во время проведения очередной операции, то можно вычислить вероятность общего успеха или неуспеха.

Таким образом, вероятность успеха или провала – основной показатель как для миссии в целом, так и для отдельных полетных операций. Именно этот показатель рассчитывается в программно-математическом комплексе.

Сценарные модели рисков

Среди всех последствий нештатных ситуаций в качестве примера выделим случайные события, приводящие к аварийному прекращению миссии. Возможно сосредоточение и на других последствиях, но в качестве образца для рассуждений и моделирования принято так.

Одной из самых важных проблем является риск по отношению к способам прерывания (то есть, возвращения на Землю) в течение штатной миссии. В некоторый момент полета для экипажа может оказаться критически важным более быстрое, чем в штатном режиме, возвращение на Землю. В этом случае важно оценить энергетические затраты, требуемые для такого маневра прерывания, выражаемые в корректирующем импульсе (изменении характеристической скорости) ΔV . В результате расчетов можно построить функциональную зависимость величины потребного корректирующего импульса от момента прерывания миссии [4]. Дальнейшие вычисления могут позволить сопоставить требуемое для аварийного возвращения количество

топлива и фактически имеющееся в наличии на момент прерывания миссии. Таким образом, можно выявить моменты времени, когда аварийное возвращение физически реализуемо и не реализуемо.

Если еще дополнительно рассмотреть нештатную ситуацию, приводящую к потере топлива, то можно учесть и это. Таким образом, рассматривается следующий сценарий: во время проведения какой-либо операции происходит нештатная потеря топлива плюс какие-то критические, но не катастрофические, отказы оборудования, в результате операция прерывается, миссия прекращается и происходит аварийное возвращение КА на Землю.

В этом случае штатная схема полета должна быть заменена на одну из альтернативных схем, соответствующих быстрому возвращению на Землю в случае пилотируемого полета или важного автоматического полета, когда необходимо доставить полезный груз на Землю.

Для построенной альтернативной полетной схемы можно грубо оценить энергетические затраты, исходя из упрощенных моделей расчета для идеальных характеристических скоростей. Для каждой операции новой схемы рассчитываются или задаются внешним образом коррекции импульса скорости, далее по формуле Циолковского оцениваются затраты топлива на каждую операцию. Если в ходе вычислений для какой-либо операции выяснится, что топлива не хватает, это означает провал аварийного возвращения и катастрофу.

Такой расчет может быть проведен для различных моментов прерывания и различных величин потерь топлива. На выходе после всех расчетов получится зависимость максимально возможной величины потерь топлива от момента прерывания, когда безопасное возвращение на Землю еще возможно.

В настоящей версии ПМК в вычислительную подсистему включен алгоритм проверки того, хватает ли имеющегося на борту космического аппарата (точнее, ведущего космического средства космической связи) топлива для осуществления текущей операции. Таким образом, имеется

принципиальная возможность решения рассмотренной выше задачи расчета рисков аварийного возвращения.

Вероятностные модели рисков

Вся миссия разбивается на совокупность операций согласно баллистической схеме полета. Во время выполнения операции могут произойти отказы активно работающих бортовых систем. Предполагается, что неработающее во время операции оборудование из строя не выходит. Ради упрощения будем считать такие отказы стандартизованными и достаточно серьезными, приводящими либо к катастрофическим, либо к критическим нештатным ситуациям (аварийным ситуациям). Таким образом, замечания не рассматриваются.

Одновременный отказ нескольких работающих во время операции бортовых систем также возможен, кроме того, возможна ситуация, когда при выполнении некоторой операции отказала одна бортовая система, а при выполнении другой операции произошел отказ другой бортовой системы. Таким образом, в течение всего полета возможны самые разные сочетания отказов бортовых систем, произошедших к текущему моменту времени. Если рассматривается всего n бортовых систем, то, в общем случае, имеем 2^n сочетаний. Все такие сочетания разбиваются на два множества: приводящие к провалу миссии и не приводящие к нему, вместе эти множества образуют полную группу событий.

Если к моменту завершения миссии провала не произошло, это означает ее успех:

Успех миссии = Не Провал миссии в момент $t_{\text{конеч}}$.

Далее, возможны варианты, связанные с независимостью отказов и серьезностью их последствий.

Вариант 1: независимость отказов оборудования

Все отказы происходят независимо друг от друга по времени: отказ одной БС, не приводящий к провалу миссии, не влияет на отказ других БС в последующие моменты времени. Обозначим:

F – множество провала – множество сочетаний отказов (случайных событий), ведущих к провалу миссии;

A – произвольный элемент множества F , то есть совокупность отказов БС, приводящих к провалу миссии;

S – множество успешности – множество сочетаний отказов, не приводящих к провалу миссии;

V – произвольный элемент множества S ;

$P_A(t)$ – вероятность наступления события A к моменту времени t ;

$P_F(t)$ – вероятность провала в момент времени t ;

$P_V(t)$ – вероятность наступления события V к моменту времени t ;

$P_S(t)$ – вероятность успеха в момент времени t .

Понятно, что множества F и S непустые: если отказали все БС, то имеет место провал, в противоположном случае, если ни одна БС не отказала, то провала нет.

Можно записать следующие формулы:

$$P_F(t) = \sum_{A \in F} P_A(t), \quad (2)$$

$$P_S(t) = \sum_{V \in S} P_V(t). \quad (3)$$

Ясно, что сумма вероятностей $P_F(t)$ и $P_S(t)$ всегда равна единице.

В качестве элементарного случайного события рассматривается отказ или надежная работа какой-то одной БС. Событие A состоит из пересечения некоторых таких элементарных событий. Обозначим:

A_i – отказ бортовой системы с номером i ;

\bar{A}_i – надежная работа (не отказ) бортовой системы с номером i ;

E_i – элементарное событие, либо A_i , либо \bar{A}_i ;

$P_i(t)$ – вероятность отказа бортовой системы с номером i к моменту времени t .

К текущему моменту времени любая бортовая система либо работает, либо отказала. В этом случае, в силу независимости этих событий, имеем (в качестве примера):

$$A = \prod_{i=1}^n E_i = \bar{A}_1 A_2 \dots \bar{A}_n, \quad (4)$$

$$P_A(t) = \prod_{i=1}^n P_{E_i}(t) = (1 - P_1(t)) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot (1 - P_n(t)). \quad (5)$$

Если подставить (5) в (2), то окончательно получим формулу для вычисления вероятности провала миссии в произвольный момент времени. Соответственно, вероятность успешного завершения миссии P_S определяется по конечному моменту $t_{\text{конеч}}$:

$$P_S = 1 - P_F(t_{\text{конеч}}). \quad (6)$$

Аналогично можно представить случайные события V , не приводящие к провалу миссии и их вероятности. Соответственно, формулы также аналогичны, но позволяют рассчитать вероятность успеха миссии непосредственно по формуле (3).

Простым (и потому важным) частным случаем представленной схемы расчета является вариант, когда отказ любой из БС приводит к провалу миссии. В этом случае расчетная формула упрощается:

$$P_F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)). \quad (7)$$

Вариант 2: зависимость отказов от времени работы оборудования

Все условия варианта 1 сохраняются, добавляется дополнительное условие зависимости вероятности отказа бортовых систем от продолжительности их активной работы. Не все бортовые системы КА постоянно работают. В последнем случае бортовое оборудование либо выключено, либо работает в щадящем пассивном режиме, следовательно, меньше изнашивается.

Обозначим:

$\tau_i(t)$ – суммарная продолжительность активной работы бортовой системы с номером i в момент времени t , при этом $\tau_i \leq t$;

$P_i(\tau_i, t)$ – вероятность отказа бортовой системы с номером i к моменту времени t в зависимости от продолжительности ее активной работы τ_i .

Таким образом, нужно еще дополнительно отслеживать для каждой БС накопленное время ее активной работы за все предыдущие операции. Можно записать это так:

$$\tau_i(t_f) = \tau_i(t_o) + (t_f - t_o) \cdot a_i, \quad (8)$$

где a_i – показатель активности работы БС $_i$ во время проведения данной операции. То есть:

$$a_i = \begin{cases} 1, & \text{если БС}_i \text{ активна во время операции} \\ 0, & \text{если БС}_i \text{ не активна} \end{cases}.$$

В остальной схема вычислений такая же, как и варианте 1.

Вариант 3: взаимозависимость отказов различного оборудования

Отказы появляются не независимо друг от друга. В этом случае нужно знать многомерное распределение $P(U; \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n; t)$ – вероятность провала миссии в момент времени t при случайном сочетании отказов U , суммарных

продолжительностях активной работы бортовых систем $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. В этом случае для вычислений используются формулы (2) и (8).

Более продвинутый и сложный вариант заключается в том, чтобы рассматривать отказы во время проведения какой-либо полетной операции как поток случайных событий, то есть случайный процесс. При этом учитывается порядок появления отказов и моменты их возникновения. В этом случае значение имеют условные распределения отказа данной БС в зависимости от произошедших ранее отказов других БС. Рассмотрим идею более подробно.

Пусть известна текущая операция, которую нужно рассчитать, известны полетные точки, соответствующие началу и окончанию операции; известны космические средства и модули в начале и конце операции, известны бортовые системы, активно работающие во время операции.

Далее нужно построить множество успешности S , то есть совокупность сочетаний допустимых отказов задействованных во время операции бортовых систем, которые не приводят к провалу миссии. Затем следует построить дерево отказов для данного множества, иными словами, для каждого сочетания отказов построить возможную последовательность отказов, приводящих к этому сочетанию.

В общем случае расчетная формула вероятности успеха миссии выглядит следующим образом:

$$P(S_f) = \sum_{\substack{U_o \in S_o \\ U_f \in S_f}} P(U_f | U_o) P(U_o). \quad (9)$$

Если переход из U_o в U_f невозможен, то соответствующая условная вероятность $P(U_f | U_o)$ равна нулю и слагаемое не учитывается в общей сумме. Формула (9) показывает, что для корректного вычисления вероятности успеха миссии нужно знать вероятности отдельных допустимых отказов во всех полетных точках, которые соответствуют окончанию каких-то операций.

Вариант 4: простейший подход без учета отказов оборудования

В том случае, если законы распределения отказов бортового оборудования неизвестны, возможен совсем примитивный подход расчета общей вероятности успеха или провала. Для этого нужно знать оценки вероятностей успешного проведения операций (либо, наоборот, их провала). Для успешного завершения миссии необходимо, чтобы все операции также успешно завершились. Если предполагать, что операции проводятся таким образом, что вероятности их успеха не зависят от успеха предыдущих операций, то есть отсутствует последствие, то в этом случае, перемножив все данные вероятности, получим вероятность успеха миссии в целом.

Если обозначить:

N – количество операций в схеме полета;

p_1, p_2, \dots, p_N – вероятности успешного проведения операций в схеме полета;

то имеем:

$$P_S = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_N. \quad (10)$$

Вариант 5: статистическое моделирование

Все предыдущие варианты являются аналитическими, они позволяют получить конечные расчетные формулы. Однако эти формулы могут оказаться весьма громоздкими и неудобными для вычислений. Возможен непосредственный численный метод оценки вероятности успеха или провала миссии, основанный на методе Монте-Карло [9, 10].

Суть заключается в том, чтобы рассмотреть много реализаций случайных отказов всех участвующих в миссии БС, учитывая их надежность и законы распределения отказов. Среди всех этих реализаций нужно посчитать долю успешных, не приводящих к провалу миссии, то есть отношение количества

успешных реализаций K_s к общему количеству реализаций K , и, таким образом, получить оценку для вероятности успеха миссии:

$$P_s = \frac{K_s}{K}. \quad (11)$$

Понятно, что чем больше K , тем точнее оценка. Дальнейшая адаптация метода приводит к двум возможностям.

1. Отказы БС происходят независимо. В таком случае возможно последовательное статистическое разыгрывание совокупности отказов. Для каждой БС известны интервалы ее активной работы, то есть временная протяженность, на которой может произойти отказ (и выход из строя БС). Используя закон распределения отказов данной БС в зависимости от времени ее работы, моделируется момент времени отказа и определяется, произошел ли отказ в заданном временном диапазоне. Так происходит для всех БС поочередно, и получается одна реализация отказов за всю миссию. Осуществив по аналогии множество реализаций, можно выделить из них успешные и провальные, а дальше действовать по формуле (11).

2. Если отказы зависят друг от друга, нужно представить плотность распределения отказов всех БС в виде произведения условных плотностей каждого из отказов. Такое представление неоднозначно с точки зрения порядка умножения условных плотностей, что задает дополнительную неопределенность в разыгрывании, она также должна учитываться в конкретном вычислительном алгоритме. Иначе говоря, необходимо корректно задать порядок отказов с учетом последовательности проведения операций и активно работающих при этом бортовых систем, поскольку отказы, появившиеся раньше, влияют на отказы, появившиеся позже, а не наоборот. Это приводит к идее последовательного локального разыгрывания отказов во время выполнения одной операции. При переходе от операции к операции в рамках полетной схемы нужно учитывать ранее произошедшие отказы БС и их

влияние на модификацию закона распределения возможных отказов других БС. Розыгрывание может продолжаться до провала миссии, после чего останавливается и результат запоминается, отсутствие провала в розыгрыше означает успех миссии. Проведя подобным образом большое количество розыгрышей, можно получить искомую оценку вероятности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований можно сформулировать следующие предложения по развитию работы и разработке полноценной версии программно-математического комплекса.

- Разработка и адаптация средств отображения массивных объемов данных, полученных при численном моделировании, непосредственно в веб-среде.
- Расширение библиотеки подключаемых вычислительных алгоритмов и математических методов для расчетов технико-экономических показателей и показателей риска космических миссий и программ.
- Разработка более интеллектуального интерфейса, допускающего формирование конфигураций задач разных типов и формирование различных схем расчетов с применением разных типов алгоритмов.
- Расширение круга задач, решаемых ПМК, включая задачи оценки длительных миссий и жизненного цикла космических аппаратов длительного и многократного использования.

Результаты проведенных исследований могут использоваться для совершенствования и развития инструментария оценивания космических проектов и программ, для создания и развития автоматизированных систем принятия решений и проектирования в сфере космической деятельности. Разработанный прототип программного комплекса является основой создания

полноценного программно-математического обеспечения для оценки основных технико-экономических показателей космических миссий и программ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Программно-математические комплексы систем поддержки принятия решений нового поколения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 59. 32 с.
2. Формат описания структурированных данных JSON, статья в Wikipedia. URL: <http://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=JSON>.
3. Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В. Введение в Octave для инженеров и математиков. – М.: ALT Linux, 2012. – 368 с.
4. Космические миссии и планетарная защита. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 276 с.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Пер. с англ. под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Издательство «Советское радио», 1969. – 488 с.
6. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
7. Инженерный справочник по космической технике. Издание 2-е, переработанное и дополненное. / Редактор А.В. Солодов. – М.: Военное издательство, 1977. – 430 с.
8. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. Учебное пособие в 2-х частях. Часть 2. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.
9. Дуб Дж.Л. Вероятностные процессы / Пер. с англ. под ред. А.М. Яглома. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956.
10. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973. – 312 с.

Содержание

Введение	3
Общее описание программно-математического комплекса «КОСКОН»	11
Описание архитектуры ПМК «КОСКОН»	11
Цикл работы пользователя с ПМК и конфигурация задачи	13
Файловая структура приложения, хранилище данных и формат рабочих файлов	15
Графический интерфейс	17
Общие сведения о графическом интерфейсе	17
Редактирование параметров неграфических элементов	19
Редактирование графических элементов	19
Расчет	20
Формирование отчета	20
Вычислительный слой	21
Математический аппарат ПМК	22
Оценка реализуемости космических полетов	22
Оценка рисков космических полетов: идеи и подходы	23
Сценарные модели риска	25
Вероятностные модели риска	27
Вариант 1: независимость отказов оборудования	28
Вариант 2: зависимость отказов от времени работы оборудования	30
Вариант 3: взаимозависимость отказов различного оборудования	30
Вариант 4: простейший подход без учета отказов оборудования	32
Вариант 5: статистическое моделирование	32
Заключение	34
Библиографический список	35