

УДК 629.78.018

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ЭТАПЕ КОМПЛЕКСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

© 2013 В. В. Белова

ОАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, г. Королёв

В статье представлена структура логико-математической модели анализа и контроля надёжности сложной технической системы полномасштабного изделия при наземной экспериментальной отработке на этапе комплексных электрических испытаний для интегрирования в процесс испытаний программного обеспечения Relex.

Автоматизированная испытательная система космических аппаратов, структурная схема надёжности, вероятность безотказной работы (функция надёжности), комплекс автоматизированной обработки телеметрической информации, оценка показателя надёжности.

Введение

В связи с началом внедрения в ОАО РКК «Энергия» программного обеспечения (ПО) Relex (Relex software Corporation, США), представленного на российском рынке компанией РТС (Parametric Technology Corporation) [1] для управления качеством, надёжностью и рисками на протяжении всего жизненного цикла информационной поддержки изделий корпорации (Product Lifecycle Management), становится актуальной задача совершенствования методологии вероятностного анализа и контроля надёжности космических аппаратов (КА) на этапе комплексных электрических испытаний (КЭИ).

Relex представляет пакет аналитических методов в отрасли и может быть развёрнут как автономное или интегрированное приложение по обеспечению надёжности. Набор инструментов Relex автоматизирует совместное использование данных по надёжности различными модулями, обеспечивая обновление в реальном времени. Он также предоставляет возможность интеграции с другими конструкторскими приложениями простыми средствами импорта/экспорта или средствами на основе XML, поддержки интерфейсов Microsoft Windows и веб-

браузера, а также сред баз данных Microsoft SQL Express, Microsoft SQL Server и Oracle. На российском рынке конкурентом Relex является израильская компания «A.L.D.», предлагающая сервис-ориентированные подходы к проблемам обеспечения надёжности.

Но даже самые специализированные программные средства не в состоянии оказать всестороннюю поддержку при проведении автоматизированного анализа надёжности. Возможны два варианта решения этой задачи [2]. Первый – это создание ПО, реализующего как основные классы моделей и методов анализа (логико-вероятностные, марковские, статистическое моделирование), так и модели и методы, учитывающие особенности объекта исследования и этапа жизненного цикла изделия. Второй – модификация и доработка универсальных программ анализа надёжности с целью внедрения специальных моделей и методов. Второй вариант экономически эффективен, поскольку позволяет с меньшими трудозатратами выполнить специальные задачи, не отвлекаясь на уже решённые проблемы и используя созданные программно-реализованные разработки. Вариант основывается на решении научной задачи декомпозиции исследуемой системы, разработке моделей и методов, адекватных

структуре и особенностям функционирования, отказов и восстановления выделенных при декомпозиции частей, агрегировании полученных моделей и рассчитанных показателей в общесистемные модель и показатели [2].

Этап КЭИ является одним из заключительных этапов наземных испытаний. На этом этапе актуальны задачи анализа, контроля и оценки надёжности сложной технической системы (СТС) по результатам испытаний [3]. Классические методы статистической оценки надёжности [4] предполагают наличие достаточного количества достоверных экспериментальных данных для подтверждения заданного уровня [5]. При ограничениях на длительность и объём испытаний целесообразно применение расчётно-экспериментального метода, являющегося приоритетным в случае испытаний изделия в неполном составе [6]. В работах [7,8] обоснована методика контроля единичного показателя надёжности (ПН) типа вероятность для системы средств обеспечения теплового режима полномасштабного изделия Малого исследовательского модуля Международной космической станции при наземной экспериментальной отработке

на этапе КЭИ. Логической моделью представления взаимосвязанных задач служит иерархическая структура испытаний и программа-методика (ПМ) КЭИ. В математическую модель входят расчётные модели ПМ надёжности и модели оценки по экспериментальным результатам испытаний.

Задача контроля и управления техническим состоянием изделия средствами автоматизированной испытательной системы (АИС) решается с применением статической модели испытаний (с допусковым многопараметрическим контролем). На рис.1 представлена структура управляющей части АИС, где ПК – персональный компьютер; ЦПКУ – центральный ПК управления; ПККИ – персональный компьютер команд и измерений; ВПКУ – вспомогательный ПК управления; НТК СИ – наземный технологический комплекс системы измерений; СС БВС – система связи с бортовой вычислительной системой. Задачу оценки технического состояния изделия по данным телеметрической информации решает комплекс автоматизированной обработки телеметрической информации (КАО ТМИ), входящий в состав НТК СИ.

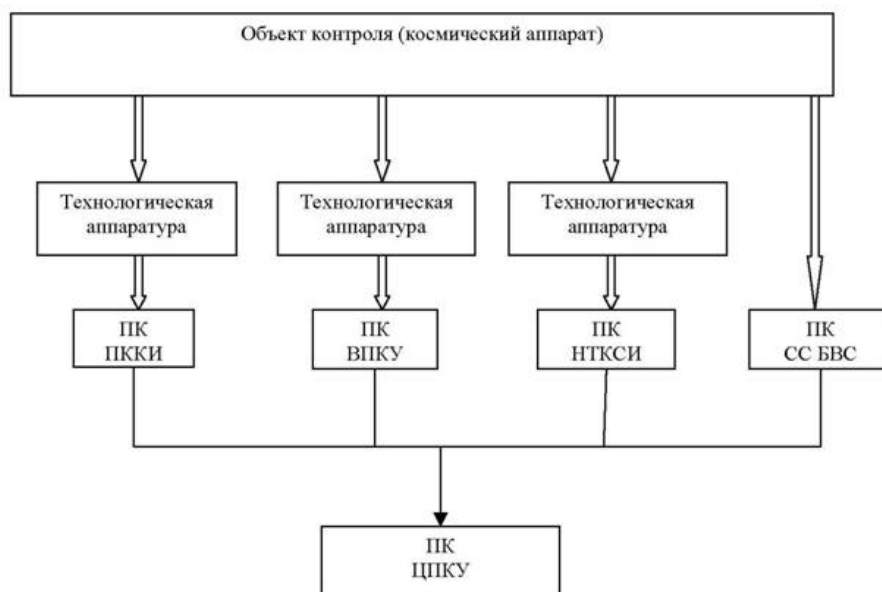


Рис.1. АИС

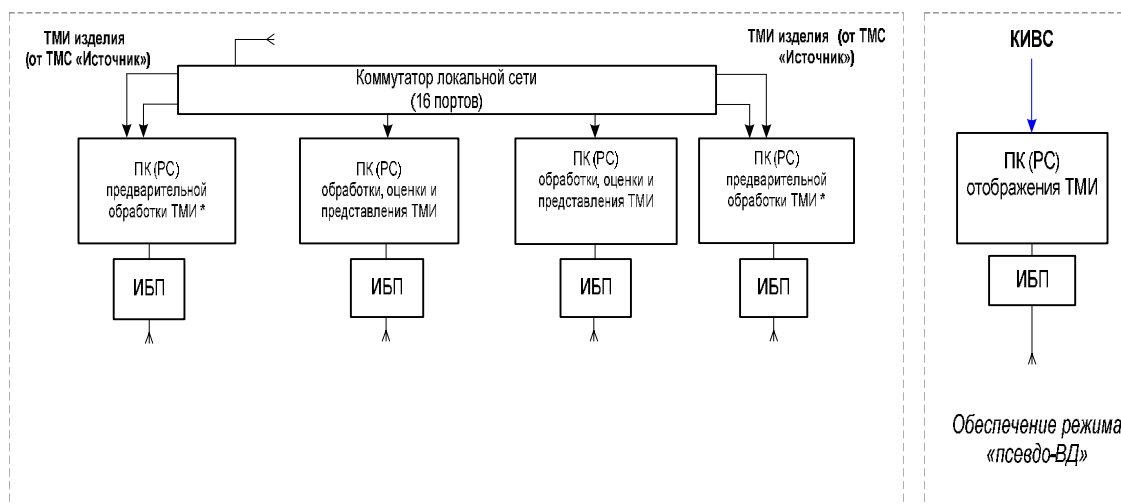


Рис.2. КАО ТМИ

На рис.2 представлена информационная структура КАО ТМИ, где АРМ – автоматизированное рабочее место. Модель функционирования и контроля работоспособности СТС в составе изделия определяется её структурной схемой надёжности (ССН) и уровневой иерархией управляющих воздействий в модели управления объектом контроля (КА).

В данной работе предлагается развитие методики, изложенной в [7, 8]. Рассматривается объединение экспериментальных данных испытаний и данных расчётных модулей ПО Relex с целью построения адекватной модели надёжности СТС (статической или динамической) на этапе КЭИ и моделирования её ПН известными аналитическими методами.

Актуальная идея контроля надёжности и технической эффективности СТС [9] для всех видов испытаний, в том числе сертификационных [10], становится реализуемой программно.

Анализ структуры и функциональные возможности ПО Relex применительно к задачам испытаний

ПО Relex позволяет проводить логико-вероятностный анализ надёжности и безопасности СТС и включает десять отдельных аналитических модулей [1], яв-

ляющихся клиент-серверными приложениями.

1. Модуль **Reliability Prediction** (прогноз безотказности). Анализ надёжности при помощи общепринятых стандартов. Содержит модели для расчета ПН.

2. Модуль **OpSim** (оптимизация и моделирование). Содержит сложные диаграммы блоков надёжности (RBD - Reliability Bloc Diagram).

3. Модуль **FMEA** (анализ видов, последствий и критичности отказов).

4. Модуль **Fault Tree** (дерево неисправностей) производит количественную оценку факторов риска и надёжности системы.

5. Модуль **FRACAS** (система регистрации сбоев, анализа и корректирующих действий).

6. Модуль **Weibull** (распределение Вейбулла) выявляет тенденции сбоев и прогнозирует их характер. Применяется для обработки результатов испытаний. Позволяет планировать процедуру испытаний, отслеживать повышение надёжности. Упрощает сбор и анализ данных на всех этапах жизненного цикла изделия.

7. Модуль **Maintainability Prediction** (прогнозирование ремонтпригодности) позволяет проводить анализ показателей технического обслуживания и ремонта любых систем и прогнозировать сроки, трудозатраты обслуживающего

персонала и множество других параметров обслуживания. Разработан на основе стандартов США.

8. Модуль **Markov** (анализ марковского процесса) проводит вычисления основных показателей работы и надёжности СТС. С помощью этого модуля разрабатываются динамические модели надёжности. Позволяет рассчитывать вероятность безотказной работы (ВБР) на заданном интервале времени.

9. Модуль **Life Cycle Cost** (анализ затрат в течение жизненного цикла продукта) прогнозирует стоимость эксплуатации изделия в течение всего срока службы.

10. Модуль **Human Factors Risk Analysis** (анализ рисков, связанных с человеческим фактором) упрощает анализ любых процессов, обусловленных ошибками, вызванными человеческим фактором, и помогает оценить и предотвратить соответствующие риски. Основан на методике NASA.

Наиболее востребованным для этапа испытаний на сегодняшний день является модуль **Relex FRACAS** (Failure Reporting Analysis and Corrective Action System – Система оповещения об отказах, анализе и корректирующих действиях), который позволяет устранять ошибки в изделиях и СТС, а также анализировать неисправности, регистрируя данные о неполадках и упрощая реализацию замкнутого процесса корректирующих действий. FRACAS позволяет создавать базы данных, переводя разнородные данные в структурированную информацию о качестве. Регистрация кратковременных, самоустраняющихся отказов (сбоев) актуальна не только для самого КА, но и для испытательной аппаратуры.

Модуль Human Factors Risk Analysis актуален для оценки функциональной эффективности и надёжности систем «человек-машина», в конкретном случае для комплекса «оператор – АИС – КА». Следует отметить, что существующие на рынке отечественного ПО программные комплексы, позволяющие проводить ав-

томатизированный расчет надёжности СТС, не имеют модулей, функционально подобных модулям 9,10 Relex.

Математическая постановка задач на этапе КЭИ

В качестве показателя надёжности выступает эффективность выполнения целевой задачи (вероятность безотказной работы), имитируемой средствами АИС. При оценке ВБР задаётся состав функций, определяющих безотказное состояние, и период времени, для которого должна быть оценена вероятность выполнения этих функций.

Задача №1 статистического контроля показателя надёжности в классической постановке рассматривалась в [5]. Контрольными называются такие испытания, цель которых – проверка соответствия изделия (характеристик и параметров) заданным требованиям технических условий [3]. Эти испытания заканчиваются решением о приёме либо браковке изделия. Они базируются на том или ином решающем правиле, точность которого задается приёмочным R_0 и браковочным R_1 уровнями заданного показателя, а достоверность определяется рисками поставщика a и потребителя b (при двухуровневом методе контроля надёжности).

Задача №2 оценки показателя надёжности отражает эффективность контроля технического состояния (определяется принятой системой контроля в АИС): необходима наилучшая точная оценка (несмещённая, состоятельная эффективная). Точность результата характеризуется доверительными границами \underline{R}, \bar{R} , а достоверность – доверительной вероятностью g . Выполняются соотношения:

$$P\{\underline{R} \leq R \leq \bar{R}\} = g$$

или

$$P\{\bar{R} \geq R\} = g_1, P\{\underline{R} \leq R\} = g_2,$$

где $R = j(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n)$, $\theta_i, i = \overline{1, n}$ – ПН ;

\underline{R} – нижняя доверительная граница R ;
 \overline{R} – верхняя доверительная граница R ;
 R – функция надёжности [5].

Для решения задач №1 и №2 требуются данные, которые можно рассчитать с использованием аналитических модулей ПО Relex. Перечень формализованных постановок не ограничен задачами №1 и №2 и может быть расширен.

Логико-математическая модель анализа и контроля надёжности на этапе КЭИ, отражающая логическую иерархию

комплексных электрических испытаний и математическую модель расчёта данных по надёжности, основанную на платформе единой базы данных ПО Relex, представлена на рис. 3, где ТЗ – техническое задание; ПВ – проверочные включения; КИ – комплексные испытания; Reliability Prediction, OpSim, FMEA, Fault Tree, FRACAS, Weibull, Maintainability Prediction, Markov, Life Cycle Cost, Human Factors Risk Analysis – аналитические модули Relex соответственно.

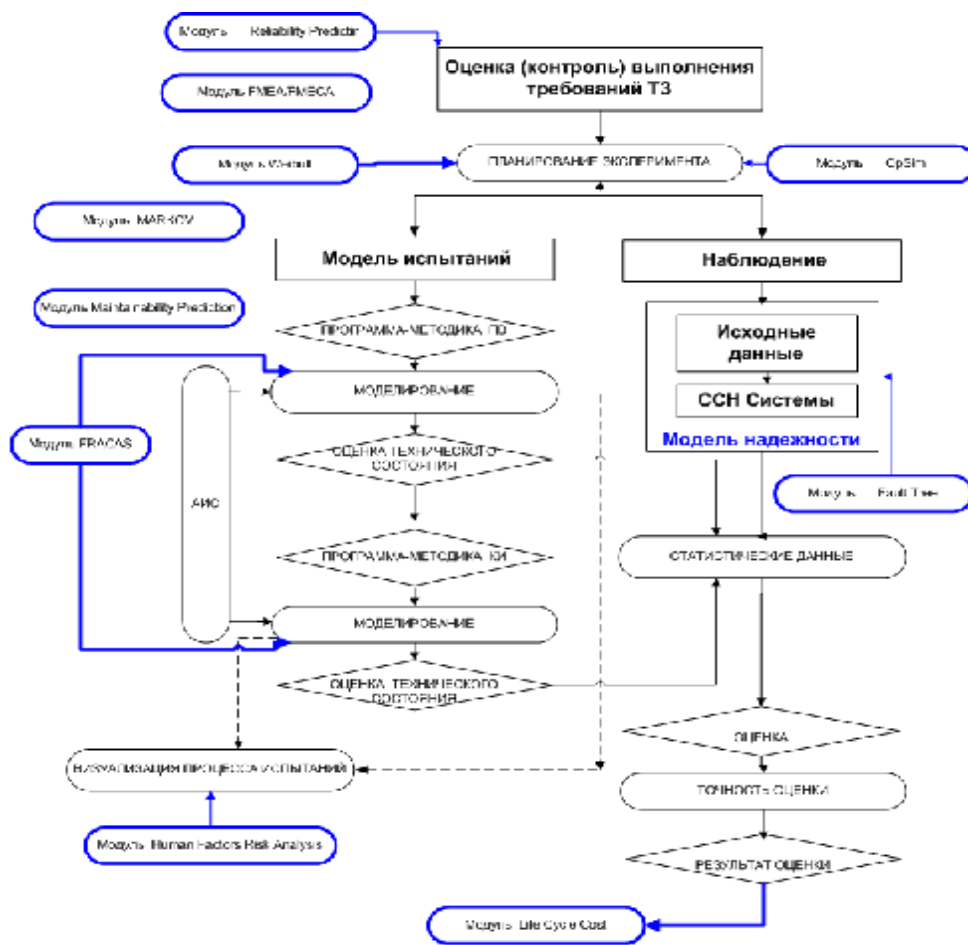


Рис.3. Логико-математическая модель контроля надёжности на этапе КЭИ

Модель надёжности

В настоящее время на этапе КЭИ явно применяется статическая модель надёжности, в которой состояние системы определяется наборами работоспособных и неработоспособных элементов в момент

времени t . В рамках статических моделей анализ надёжности проводится методами [2], использующими основные формулы теории вероятностей и комбинаторики.

Другим направлением являются методы, основанные на записи логических условий функций работоспособности че-

рез состояния элементов системы с последующим применением алгебры логики (логику-вероятностные методы, используемые в деревьях отказов, схемах функциональной целостности и ССН). Исходными данными для логику-вероятностных моделей надёжности СТС являются вероятности истинности отдельных аргументов в функциях алгебры логики, описывающих работоспособность системы.

Классические статические модели для восстанавливаемых систем позволяют рассчитывать только дифференциальные (мгновенные) ПН, определяемые в момент t . Динамические модели позволяют вычислять все основные ПН: мгновенные, интервальные (ВБР на интервале времени), не зависящие от времени стационарные интервальные показатели и т.д. В этих моделях учитываются любые особенности функционирования за счёт быстрого роста размерности задачи.

Аналитические марковские модели надёжности являются наиболее предпочтительными при анализе высоконадёжных систем. Но при их использовании возникают проблемы размерности роста пространства состояний модели. Вычислительные мощности современных компьютеров позволяют решить часть проблемы, связанную со сложностью численного решения систем дифференциальных и алгебраических уравнений большой размерности, порождаемых марковскими графами. Но для разработчика математической модели построение марковского графа с большим количеством вершин является трудновыполнимой задачей.

Таким образом, задача адекватного моделирования надёжности СТС может решаться при использовании декомпозиции системы (структурной, логической и т.д.) и разработке моделей и методов, адекватных структуре и особенностям функционирования.

Методология испытаний

Программа-методика КЭИ является структурной основой для применения методов анализа, контроля и оценки надёж-

ности и состоит из следующих функциональных единиц.

1 – Модель испытаний. Структурно-функциональную моделью испытаний изделия является принципиальная электрическая схема. Детерминированной математической моделью испытаний изделия являются базы данных для систем: БВС, системы бортовых измерений, АИС, комплексного стенда Международной космической станции.

Моделью управления является база данных управляющих воздействий бортовой вычислительной системы. В результате управления эти воздействия переводят контролируемую систему на повторное решение задачи (при наличии сбоя), переключают на резерв отказавшие устройства (при наличии неисправности), а также сигнализируют о факте и месте появления неисправности. Так как требуемое поведение, условия работы системы, а также её свойства заранее известны, то для управления качеством функционирования системы используется информация о последовательности воздействий в виде программы управления. Каждая ступень иерархии и их число определяется соответствующей (принятой) структурой процесса построения управления.

Техническое состояние системы оценивается телеметрическими и технологическими параметрами. Контроль параметров осуществляется в допусковом интервале (задаются разработчиками) для всех штатных режимов.

2 – Структурная схема надёжности системы. Для расчёта надёжности используется метод структурных схем. Отказ каждого из элементов может происходить по двум причинам: обрыв (т.е. невозможность замыкания цепи) и замыкание (т.е. невозможность размыкания соединения). В случае отказа типа «обрыв» схема надёжности соответствует электрической схеме, в случае отказа типа «замыкание» схема надёжности противоположна электрической схеме.

3 – Планирование наземных испытаний. Программа-методика испытаний

устанавливает план испытаний, методы обработки данных, правила принятия решений.

4 – Программа-методика проверочных включений. Проверочные включения проводятся в целях подтверждения работоспособности бортовых систем в штатной схеме изделия (штатное питание, управление и контроль) и предусматривают проверку функционирования систем изделия во всех предусмотренных режимах, включая расчётные нештатные ситуации, с использованием штатных и технологических команд управления, оценкой штатной и технологической сигнализации и телеметрических параметров [11]. Проверка штатных алгоритмов управления проводится в максимально возможном объеме с имитацией предусмотренных нештатных ситуаций. В случае отсутствия систем, приборов или агрегатов на первом этапе КЭИ предусмотрены имитаторы или эквиваленты отсутствующих систем.

5 – Программа-методика комплексных испытаний. При проведении комплексных испытаний систем изделия проверяется совместное функционирование систем по программам, близким к программе натурных испытаний; отрабатываются вопросы взаимовлияния систем при совместной работе, типовые полётные операции, используемые в программе полёта.

6 – Оценка экспериментальных данных. Документом о результатах проведенного испытания является протокол АИС раздела испытаний, в котором регистрируется временная последовательность управляющих воздействий, измерение и оценка контролируемых параметров в алгоритме проверки. Контролируемой статистикой также служит суммарная нагрузка выработки ресурса прибора системы по параметру.

7 – Автоматизированная испытательная система. Отдел-разработчик технической системы определяет программно-методику испытаний системы. На основании программы-методики систем составляется обобщенный алгоритм испытаний.

Программное обеспечение АИС делится на общесистемное и специальное для конкретного КА и выполняет следующие функции: 1) разработка, ввод в АИС программ проверок, реализующих алгоритмы КЭИ (включая расчётные нештатные ситуации); 2) выдача из АИС воздействий на КА в соответствии с программно-методикой испытаний; 3) приём из КА в АИС параметров контроля состояния бортовой аппаратуры; 4) формирование прогноза состояния параметров (модельных значений); 5) сравнение модельных значений параметров с реальными значениями методом допускового контроля.

Сопряжение управляющей части АИС с КА представлено на рис.1 и поэтому не отражено в модели на рис. 3.

8 – Моделирование. При моделировании процесса испытаний применяется системный метод в обеспечении безотказности – построение «дерева событий» или «дерева безотказной работы». В рамках вероятностного подхода к анализу надёжности используется графический метод «дерева событий». Моделирование включает программные измерения технических характеристик элемента системы при имитации воздействий на них (в том числе технологических), имитации аварий, а также сравнение технических характеристик и параметров системы с математической моделью. Имитация алгоритма проверки осуществляется в режиме реального времени и заключается в определении работоспособности каждого из возможных состояний системы при различных сочетаниях работоспособных и неработоспособных элементов.

Комплекс автоматизированной оценки телеметрической информации не выделен отдельным функциональным блоком в модели на рис. 3, так как является составной частью наземного технологического комплекса системы измерений. По тракту НТК СИ (рис.1) в АИС запрашиваются значения параметров КА, контролируемых бортовой информационной телеметрической системой.

Заключение

В статье представлены результаты построения общей логико-математической модели анализа, контроля и оценки надёжности структурно-сложной технической системы в составе изделия на этапе комплексных электрических испытаний средствами программного обеспечения: автоматизированной испытательной системы, комплекса автоматизированной оценки телеметрической информации, программного комплекса по моделированию надёжности Relex.

Программа-методика комплексных электрических испытаний является логическим базисом модели. Математическая составляющая модели определяется внедряемой технологией автоматизированного структурно-логического моделирования и единой интегрированной платформой базы данных Relex.

Для задачи автоматизации анализа надёжности структурно-сложной технической системы актуален подход к программной реализации новых моделей и методов анализа, сопрягаемых с универсальным программным обеспечением Relex, что является функциональным развитием методики.

Библиографический список

1. Общие ресурсы РТС: сайт Parametric Technology Corporation. 2011 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.relex.com> (дата обращения 06.07.2011).
2. Викторова, В.С. Анализ надёжности системы сложной структуры на многоуровневых моделях [Текст] / В.С. Викторова, А.С. Степанянц // Автоматика и телемеханика. – 2010. – №7. – С.43-48.
3. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 24 с.
4. Барлоу, Р. Статистическая теория надёжности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан; пер. с англ. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
5. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надёжности [Текст]/ Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьёв. – М.: Наука, 1965. – 554 с.
6. Надёжность технических систем [Текст]: справ. / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [и др.]; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
7. Белова, В.В. Контроль надёжности системы средств обеспечения теплового режима исследовательского модуля Международной космической станции на этапе комплексных электрических испытаний [Текст]/ В.В. Белова // Известия РАН. Энергетика. – 2011. – №3. – С.42-52.
8. Белова, В.В. Оценка показателей надёжности системы на этапе наземных испытаний [Текст] / В.В. Белова // К.Э. Циолковский и современность: материалы XLV научных чтений памяти К.Э. Циолковского. – Калуга: ИП Кошелев А.Б. (Издательство «Эйдос»), 2010. – С.127-128.
9. Надёжность и эффективность в технике [Текст]: справ. В 10 т. / В.С. Авдеевский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 6: Экспериментальная отработка и испытания / Р.С. Судаков, О.И. Тескин. – 376 с.
10. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем [Текст]: учеб. пособие / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов [и др.]. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
11. Методы минимизации количества телеметрируемых параметров разгонного блока [Текст] / В.М. Филин, В.П. Клиппа, Л.А. Пчелинцев [и др.]. – М.: Издательство СИП РИА, 1999. – 308 с.

**IMPROVEMENTS IN METHODS OF ANALYSIS
AND CONTROL OF SPACE-ROCKET EQUIPMENT RELIABILITY
AT THE STAGE OF COMPLEX ELECTRICAL TESTING**

© 2013 V.V. Belova

Space-Rocket Corporation «Energia» named after S.P. Korolyov, Korolyov

The paper presents the structure of a logical-mathematical model for the control and analysis of the reliability of a complex engineering system of a full-scale item of equipment with ground experimental development at the stage of complex electrical tests for the integration in the process of testing Relex software.

Computer-aided spacecraft testing systems, reliability block diagram, probability of failure-free operation (reliability function), computer-aided complex of telemetric information processing, assessment of reliability rate.

Информация об авторе

Белова Виктория Викторовна, инженер-испытатель, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва. E-mail: post@rsce.ru. Область научных интересов: методы контроля, анализа и оценки надёжности изделий ракетно-космической техники.

Belova Victoria Victorovna, test engineer, Space-Rocket Corporation "Energia" named after S.P. Korolyov. E-mail: post@rsce.ru. Area of research: methods for verification, analysis and assessment of the reliability of space-rocket equipment items.