

УДК 629.7.018+629.7.017.1

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТРАНСПОРТНОГО ГРУЗОВОГО КОРАБЛЯ СЕРИИ «ПРОГРЕСС» НА СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ НАДЕЖНОСТИ, РАЗРАБОТАННЫХ В WINDCHILL QUALITY SOLUTIONS

В.В. Белова

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»

Россия, 141070, Королев, Ленина ул., 4а

E-mail: post@rsce.ru

Ключевые слова: надежность, эффективность, производительность, логико-вероятностная методология, расширенные блок-схемы надежности, динамическое дерево отказов, марковский граф пространства и состояний, многоуровневая модель надежности, система обеспечения теплового режима транспортного грузового корабля серии «Прогресс».

Аннотация: В классе статических моделей построена многоуровневая модель и приведена методика автоматизированного моделирования показателей надежности и технической эффективности (средней производительности) СОТР транспортного грузового корабля серии «Прогресс» (далее по тексту, СОТР ТГК). Методика базируется на основе логико-вероятностной методологии расширенных блок-схем надежности, реализованной в программном комплексе Windchill Quality Solutions версии 10.2 (ранее, Relex). Методика позволяет с заданной точностью проводить расчеты показателей надежности и эффективности для сравнительного анализа конкурирующих схемных вариантов СОТР ТГК в различных режимах использования (функционирования). Разработанная методика предназначена для инженеров проектировщиков и позволяет проводить расчеты надежности без привлечения специалистов отделов надежности.

1. Введение

Современные бортовые системы космических аппаратов (КА) (вычислительная, электропитания, обеспечения теплового режима и др.) относятся к классу сложных систем, которые, в разных режимах использования по времени, определяются наличием уровней эффективности функционирования (например, производительности). Для таких систем, обязателен расчет показателей надежности и показателей технической эф-

фактивности. Однако, бинарные модели надежности, используемые сегодня в типовых расчетных методиках, не способны учесть данное требование. При этом построение и программная реализация новых, адекватных моделей надежности и эффективности сложных систем невозможна без использования специализированных комплексов автоматизированного анализа надежности. В данных условиях, задача разработки методики автоматизированного моделирования, расчета и анализа надежности и эффективности современных систем обеспечения теплового режима (СОТР) КА является актуальной. В [1] приведена процедура построения обобщенной модели, методика и результаты автоматизированного моделирования и расчета вероятности безотказной работы (ВБР) СОТР ТГК для математических моделей анализа надежности — структурной схемы надежности (ССН), дерева отказов (ДО), динамического дерева отказов (ДДО). На этапе построения обобщенной модели надежности СОТР КА (в базовой форме дерева отказов), система подвергается декомпозиции, и к выделенным частям применяются разные методы (соответственно, разные модели). Модели разработаны в среде WQS [2]. Построенные модели являются классическими бинарными моделями надежности системы, имеющей только два уровня эффективности функционирования (отказ и работоспособность). Однако, в определенных режимах использования по времени, СОТР ТГК необходимо рассматривать как многоуровневую систему с наличием нескольких уровней эффективности функционирования (например, по производительности). С целью анализа надежности и эффективности такой многоуровневой системы предложена методика автоматизированного моделирования и расчета показателя технической эффективности (средней производительности) по электрической модели производительности [2, 3] WQS.

2. Методика автоматизированного моделирования и расчета показателя эффективности СОТР ТГК Прогресс

2.1. Надежность и эффективность системы со многими состояниями

Эффективность — свойство системы, характеризующее ее способность выполнять задачи по назначению [4]. Примером такого показателя для космической техники является «вероятность выполнения программы полета» КА [5]. Анализ эффективности проводится для систем, для которых нельзя сформулировать критерий отказа в бинарной форме «работоспособность/отказ», и сводится к стандартному анализу надежности, если выбран соответствующий критерий отказа. Например, система может рассматриваться как отказавшая, если результирующая производительность («пропускная способность») системы упала ниже некоторого заданного уровня.

Для адекватного моделирования различных ситуаций (например, для стратегии функционирования в различных режимах с заданным уровнем эффективности), техническая система может быть определена как система со многими состояниями — Multi-State System (MSS) [6] и должна описываться многоуровневой моделью работоспособности. Обычно MSS состоят из элементов, которые, в свою очередь, могут быть также многоуровневыми (иметь несколько состояний). Одним из показателей технической эффективности таких систем является коэффициент сохранения эффективности. Фактически, бинарная система является самым простым случаем MSS, имеющим два уровня (идеальное функционирование и полный отказ).

В логико-вероятностных бинарных моделях надежности, подлежат вычислению только лишь так называемые дифференциальные показатели (коэффициент готовности и параметр потока отказов). Большинство работ по методам оценки показателей на-

дежности систем в классе логико-вероятностного моделирования посвящены вычислениям вероятности выполнения заставить систему в определенном некоторой логической функцией (определенной на булевских переменных (элементах системы)) классе состояний (в частности — коэффициента готовности/простоя) [3]. Поэтому, в качестве показателей надежности (для многоуровневой модели) для сложной системы КА может быть рассмотрена «вероятность заставить систему при выполнении своей основной функции на требуемом уровне (не ниже заданного уровня) производительности». Для реализации методического подхода, когда эффективность системы определяется ее способностью достижения системной цели по производительности, для расчета показателя эффективности (средней производительности) применим модель расширенной блок-схемы надежности WQS [2]. В этом случае анализ эффективности сводится к стандартному анализу надежности, если выбран соответствующий технический критерий отказа по производительности.

2.2. Методика автоматизированного расчета показателей надежности, технической эффективности (средней производительности) на программно-реализованных в WQS моделях производительности в расширенных блок-схемах надежности

В зависимости от правила, по которому потоки суммируются на входе и делятся на выходе узлов ССН, в модели расширенной блок-схемы надежности WQS различают электрические (electricity network) и потоковые (flow network) блок-схемы для расчета пропускной способности (производительности) [1]. По количеству входных и выходных полюсов все структурные схемы можно разделить на несколько классов: двухполюсные, ветвящиеся или многополюсные. Если структура имеет один входной и один выходной полюс, ее называют двухполюсной. [7]. Функционально СОТР КА обеспечивает транспортировку, распределение и потребление тепла на КА. Поскольку СОТР КА — сетевой объект функционирования в общей системе генерации и передачи (транзита) электроэнергии КА, ее ССН — двухполюсная сетевая структура. С позиций «анализа надежности» СОТР ТГК является восстанавливаемым объектом непрерывного действия, выходной эффект от применения которого пропорционален суммарной продолжительности пребывания в работоспособном состоянии, и, в соответствии с [5,8], ее основным показателем надежности (для двухуровневой модели) является коэффициент готовности.

ССН резервированной невосстанавливаемой структуры «1 из 2» группы электронасосного агрегата контура грузового отсека (ЭНА КГО) СОТР ТГК показана на рис. 1. Схема резервирования 1 из 2 позволяет учесть все возможные уровни производительности при отказах (в отличие от схемы 2 из 2).

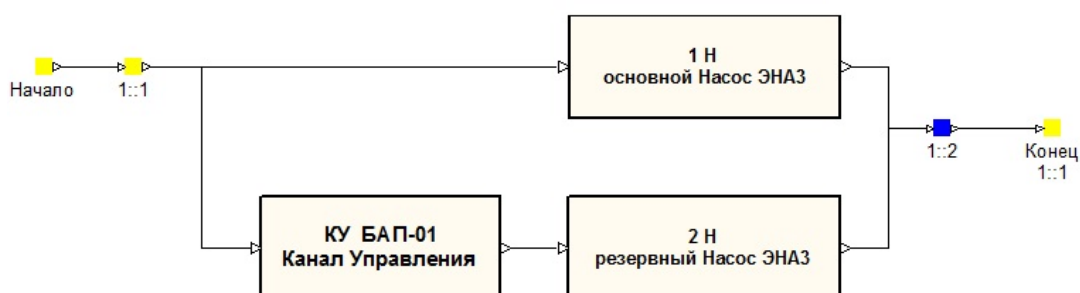


Рис. 1. Структурная схема надежности группы ЭНА КГО СОТР ТГК «Прогресс».

Рассмотрим приведенную структуру рис. 1. группы ЭНА КГО СОТР ТГК как многоуровневую систему с еще одним промежуточным классом состояний (определяемым электрической производительностью ее основного и резервного насосов 50%). Такой режим работы группы ЭНА КГО СОТР ТГК присутствовал на изделии «Прогресс М-СО1» (специализированный транспортный грузовой корабль-модуль (ГКМ) серии «Прогресс», запуск 15.09.2001 [9]). В целях увеличения ресурса работы схема канала управления обеспечивает работу насосов в двух режимах: номинальном — насосы работают с производительностью 100%, в экономичном — ЭНА работают с производительностью 50%. Уровень переключения ЭНА — 20%. Номинальный режим насосов выбирается в динамически насыщенных операциях изделия, экономичный — в дежурных режимах работы. Таким образом, структурным (логическим) отказом — рассматриваемой схемы является критерий 1 из 2. Критерием технического отказа служит условие 20% производительности системы. На рисунке 2 приведена расширенная блок-схема надежности структуры ЭНА КГО СОТР ТГК (при заданной производительности основного и резервного насосов 50% (экономичный режим) и 50% требуемой производительности системы) на участке автономного полета 720 часов.

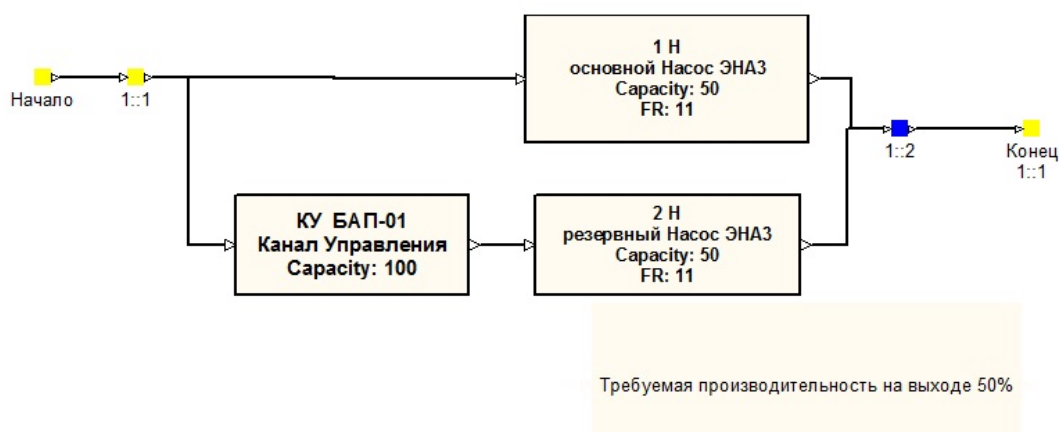


Рис. 2. Расширенная блок-схема надежности резервированной невосстанавливаемой структуры группы ЭНА КГО СОТР ТГК «Прогресс» для расчета электрической производительности на участке автономного полета 720 часов (экономичный режим).

В таблице 1. приведены результаты расчетов на многоуровневой модели показателей надежности и технической эффективности (производительности) группы ЭНА КГО СОТР ТГК «Прогресс» в системе WQS. Поведение показателей исследовано на интервале времени 720 часов и 4800 часов (или 200 суток) для сравнения разных типов схемы резервирования (1 из 2-х): с постоянным резервом и резервом замещением.

Таблица 1. Результаты моделирования надежности и эффективности группы ЭНА КГО СОТР ТГК «Прогресс» на расширенных блок-схемах надежности WQS по электрической модели производительности.

Показатели надежности и эффективности	Тип резерва, производительность основного и резервного насосов (%)					
	нагруженный, 100	нагруженный, 50	нагруженный, 20	замещением, 100	замещением, 50	замещением, 20

Показатели надежности и эффективности	Тип резерва, производительность основного и резервного насосов (%)					
	нагруженный, 100	нагруженный, 50	нагруженный, 20	замещением, 100	замещением, 50	замещением, 20
Надежность системы (ВБР) в момент времени 720 час	0.999938	0.999938	0.999938	0.999977	0.999977	0.999977
Надежность системы (ВБР) в момент времени 4800 час	0.997353	0.997353	0.997353	0.998667	0.998667	0.998667
Вероятность отказа (1-ВБР) в момент времени 720 час	0.000062	0.000062	0.000062	0.000023	0.000023	0.000023
Вероятность отказа (1-ВБР) в момент времени 4800 час	0.002647	0.002647	0.002647	0.001333	0.001333	0.001333
Производительность в момент времени 720 час	99.9943	99.20735	39.68294	99.9977	49.99885	19.99954
Производительность в момент времени 4800 час	99.7299	94.83965	37.93586	99.86670	49.93335	19.97334
Усредненная производительность на интервале (0÷720) час	99.9812	99.60390	39.84156	99.99992	49.99962	19.99985
Усредненная производительность на интервале (0÷4800) час	99.91033	97.39642	38.95857	99.95547	49.97774	19.99109
Р_уровня_100% производительности на момент 720 час	0.999938	0.984204	0	0.999977	0	0
Р_уровня_100% производительности на момент 4800 час	0.997353	0.899494	0	0.998667	0	0
Р_уровня_(50-100) % производительности на момент 720 час	0.999938	0.999943	0	0.999977	0.999977	0
Р_уровня_(50-100) % производительности на момент 4800 час	0.997353	0.997299	0	0.998667	0.998667	0
Р_уровня_(40-100) % производительности на момент 720 час	0.999938	0.999943	0.984204	0.999977	0.999977	0
Р_уровня_(40-100) % производительности на момент 4800 час	0.997353	0.997299	0.899494	0.998667	0.998667	0
Р_уровня_(20-100)% произво-	0.999938	0.999943	0.999943	0.999977	0.999977	0.999977

Показатели надежности и эффективности	Тип резерва, производительность основного и резервного насосов (%)					
	нагруженный, 100	нагруженный, 50	нагруженный, 20	замещением, 100	замещением, 50	замещением, 20
длительности на момент 720 час						
Р_уровня_(20-100)% производительности на момент 4800 час	0.997353	0.997299	0.997353	0.998667	0.998667	0.998667

Результаты анализа показали, что при выборе варианта схемы по показателю технической эффективности (средней производительности на интервале) при допустимом показателе ВБР для двух конкурирующих схем с 50% производительностью насосов с предпочтительной будет схема с постоянным резервом, так как она обеспечивает большую производительность (99.6039 % по сравнению с 49,9996 % в случае 720 час).

А по вероятностному показателю эффективности функционирования (многоуровневая модель), а именно, вероятность заставить систему в момент времени $t=4800$ час на уровне производительности $20\% < C < 100\%$ (т.е. отсутствие технического отказа), предпочтительной будет схема резерва с замещением (0.997299 по сравнению с 0.998667).

3. Заключение

Предложен подход к анализу надежности и эффективности СОТР ТГК Прогресс, основанный на применении логико-вероятностного моделирования с привлечением аппарата структурных схем надежности, расширенных блок-схем надежности, динамических деревьев отказов, марковского графа пространства и состояний. Преимуществом такого подхода является возможность построения адекватных моделей и проведение расчетов показателей с заданной точностью. В работе рассмотрена методика расчета показателей надежности и технической эффективности (средней производительности) для СОТР ТГК серии «Прогресс» на многоуровневой модели. Анализ эффективности сводится к стандартному анализу надежности (на статических моделях) с выбором критерия отказа по производительности. Приведенные результаты позволяют выдать рекомендации по перераспределению ограниченных ресурсов в подсистемах с целью повышения их эффективности и осуществить прогноз уровня эффективности системы на основе тенденций изменения (деградации) эффективности в подсистемах (элементах). Методика представляет также практический интерес для анализа надежности и эффективности восстанавливаемых (ремонтируемых) систем с длительным сроком активного существования и формирования исходных данных в задачах обоснования назначенного ресурса и порядка продления остаточного ресурса.

Список литературы

1. Белова В. В. Методика повышения достоверности оценок показателей надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата при наземных испытаниях // Ракетно-космическое приборостроение. 2015. Т. 2, Вып. 4. С. 74-86.
2. Relx 2011. Reference Manual. Relx Software Corporation. 41West Otterman Street, Greensburg, Pensilvania 15601 USA, 2011. 3172 p.
3. Викторова В.С., Степанянец А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М: ЛЕНАНД, 2014. 256 с.

4. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / под общ.ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
5. ГОСТ 27.003–16. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартиформ, 2017. 18 с.
6. Levitin G. The universal generating function in reliability analysis and optimization (Springer Series in Reliability Engineering). Part 3. Introduction to Multi-state Systems. Springer, 2005. 441 p.
7. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. С-П.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.
8. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2011. 37 с.
9. Экспедиция МКС-3. Фотоархив. Грузовой корабль-модуль «Прогресс М-СО1»: https://www.energia.ru/rus/iss/iss03/pirs/photo_archive-progress-m-co1.html.