

УДК 62-97

## Методика повышения достоверности оценок показателей надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата при наземных испытаниях

**В. В. Белова**

*ОАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С. П. Королёва»*

*e-mail: viktorija.belova@rsce.ru*

**Аннотация.** В работе рассмотрена автоматизированная методика моделирования и расчета показателя надежности (вероятности безотказной работы) системы обеспечения теплового режима транспортного грузового корабля «Прогресс». Методика базируется на основе логико-вероятностной методологии блок-схем надежности, дерева отказов, а также марковского моделирования, реализованных в специализированном программном обеспечении Windchill Quality Solutions версии 10.2 (ранее Relex).

**Ключевые слова:** логико-вероятностная методология, показатель эффективности, средняя производительность, расширенные блок-схемы надежности, электрическая модель производительности, потоковая модель производительности

## Methodology for Improving the Reliability of Parameters Estimates of Spacecraft Thermal Control System during Ground Tests

**V. V. Belova**

*ISC “Rocket and Space Corporation “Energia” after S. P. Korolev”*

*e-mail: viktorija.belova@rsce.ru*

**Abstract.** The paper considers the automated technique for modeling and calculation of reliability (probability of failure-free operation ) system for thermal control system of transport cargo ship “Progress”. The technique is based on the logical-probabilistic methodology flowcharts reliability, fault tree and Markov modeling implemented in specialized programs Windchill Quality Solutions software version 10.2 (previously , Relex).

**Key words:** logical-probabilistic methodology, performance indicator, average capacity, extended reliability block diagram, electricity network model performance, flow network model performance

## Введение

Новое научно-техническое направление теории надежности технических систем — надежность изделий ракетно-космической техники (РКТ) — возникло благодаря своей специфике: ответственность и сложность задач, особая среда функционирования изделий, малые партии поставок продукции. Анализ причин неудачных запусков и аварий ряда космических аппаратов (КА) в 2011–2013 гг. [1, 2] показал, что на этом направлении есть еще много нерешенных проблем. Одна из них — проблема повышения достоверности оценки надежности технической системы КА на исследуемом основном этапе (или фазе основного этапа) жизненного цикла (ЖЦ) изделия.

Проблема является 1) комплексной, так как распространяется на все этапы жизненного цикла КА; 2) мультидисциплинарной, так как требует привлечения прикладных методов теории надежности, теории испытаний, математической статистики, математического моделирования, информационного и программного обеспечения; 3) многосложной, так как способствует поиску взаимосвязанного решения большого количества других проблем, вытекающих из противоречий, основные из которых:

1. Действующая на предприятиях с начала 1980-х система контроля качества и надежности РКТ научного, социально-экономического, двойного и военного назначения, реализует нормативный подход. В настоящее же время, в условиях масштабной реформы отрасли, на предприятиях внедряются различные автоматизированные системы управления ЖЦ качества изделий, реализуя тем самым процессный подход в управлении надежностью.

2. Разрабатываемые сегодня современные технические системы КА характеризуются следующими особенностями:

- увеличением размерности;
- сложностью связей в структуре (в том числе немонотонной), ее неприводимостью к типовым тривиальным структурам (последовательные, параллельные и их комбинации) — структурно-сложные технические системы (ССТС);
- разнообразием методов и видов резервирования (согласно [3]);

- наличием уровней эффективности по функционированию — функционально-сложные системы;
- стратегией восстановления;
- стратегией технического обслуживания;
- зависимостью функционирования элементов как по отказам, так и по восстановлению;
- динамикой процесса отказа.

Учет этих особенностей, а также непрерывное возрастание требований технического задания к точности и достоверности показателей надежности (ПН) проектируемой системы требуют применения специализированного программного обеспечения анализа надежности.

3. «Грубые» инженерные методики расчета надежности системы на этапе проектирования, которые до сих пор используются в промышленности, не рассматривают вопросы по повышению точности и «достоверности» оценки ПН. Принято считать, что если этапе наземной экспериментальной отработки (НЭО) объем испытаний мал (или испытания безотказны), то прогноз надежности вообще теряет смысл. Однако на практике выводы на основании таких испытаний делать необходимо. Как следствие, возникают вопросы по научному обоснованию разработки методики испытаний на зачетной фазе НЭО для демонстрации достигнутого уровня надежности.

Таким образом, вопросы по повышению достоверности надежности ССТС КА на исследуемом этапе (или фазе этапа) ЖЦ изделия — проектирования, НЭО, эксплуатации и т. д. — становятся особенно актуальными.

Важное место в ряду служебных ССТС КА занимает **система обеспечения теплового режима (СОТР)**, совершенствование которой позволяет повысить массовую и энергетическую эффективность КА. СОТР по массе и потреблению энергии является существенным звеном в модели надежности КА. Она обладает всеми признаками сложной системы и имеет самостоятельную цель функционирования, согласующуюся с общей целью функционирования объекта.

В работе предложена полная и непротиворечивая концепция решения исследуемой проблемы, заключающаяся в построении расчетно-экспериментальной «Методики повышения достоверности

СОТР КА на этапе наземных испытаний», базирующейся на основе логико-вероятностной методологии блок-схем надежности, дерева отказов, фазовых диаграмм, а также марковского моделирования, реализованных в специализированном программном обеспечении Windchill Quality Solutions версии 10.2 (ранее Relx) [4].

Процедура построения «Методики» сводится к решению четырех задач:

- анализ и оценка надежности СОТР КА;
- проверка адекватности модели надежности СОТР КА (валидация и верификация);
- оценка надежности СОТР КА на этапе КЭИ;
- повышение достоверности оценки показателя надежности СОТР КА на этапе КЭИ.

«Методика повышения достоверности СОТР КА на этапе наземных испытаний» будет продемонстрирована на примере невозстанавливаемой СОТР транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» для заключительной фазы НЭО — этапа комплексных электрических испытаний (КЭИ). В качестве показателя надежности рассматривается **вероятность безотказной работы (ВБР)**. Решение вышеупомянутых задач и интерпретация результатов приводится на двух вариантах расчета: 1) для 30 суток автономного полета; 2) при продолжительности функционирования изделия до 200 суток (в том числе 30 суток автономного полета).

Структура «Методики повышения достоверности оценок показателей надежности СОТР ТГК “Прогресс” на этапе КЭИ» приведена на рис. 1, а и б.

## 1. Методика анализа и оценки надежности

Задача анализа и оценки надежности СОТР КА рассмотрена в [5, 6], где приведено ее решение — «Методика автоматизированного логико-вероятностного моделирования и расчета вероятности безотказной работы СОТР ТГК “Прогресс”» для математической модели анализа надежности: **структурной схемы надежности (ССН)**. Вышеупомянутая модель разработана с использованием графического редактора блочных диаграмм надежности

RBD (Reliability Block Diagram) аналитического модуля OpSim (Optimization and Simulation — Оптимизация и Моделирование) системы Windchill Quality Solutions (WQS) (до 2013 г. — Relx). Результаты расчета по методике отражены в техническом отчете ОАО РСК «Энергия» и использованы для научного обоснования расчетной оценки ВБР СОТР ТГК «Прогресс» для двух вариантов расчета: 1) для 30 сут автономного полета; 2) при продолжительности функционирования изделия до 200 сут (в том числе 30 сут автономного полета).

Для вариантов 1)–2) показатель ВБР СОТР ТГК «Прогресс», рассчитанный по инженерной методике отдела-разработчика, совпал с аналогичным показателем, рассчитанным по автоматизированной методике при заданной точности и уровне доверительной вероятности 0,95.

### Структурная схема надежности СОТР ТГК «Прогресс»

На рис. 2, а–д представлены некоторые ССН функциональных звеньев СОТР ТГК «Прогресс». На рис. 2, а приведена ССН СОТР. На рис. 2, б приведена ССН системы терморегулирования (СТР). На рис. 2, в приведена ССН контура грузового отсека (КГО). На рис. 2, г приведена ССН электронасосного агрегата контура грузового отсека (ЭНА КГО). На рис. 2, д приведена ССН контура навесного радиатора (КНР).

На рис. 3 приведены расчеты по методике для ВБР СОТР ТГК «Прогресс» методом ССН в момент времени 720 ч (30 сут автономного полета). Значение ВБР равно 0,9966781.

Значение (1-ВБР) равно 0,003321896. При 95 % доверительной вероятности рассчитаны верхняя и нижняя границы доверительного интервала ВБР.

Результаты автоматизированного расчета совпали с аналитическими расчетами по модели отдела-разработчика (с учетом принятых допущений), что подтверждает адекватность разработанных моделей предлагаемой методики. Кроме этого, рассматриваемая методика имеет ряд новых возможностей по сравнению с методикой отдела-разработчика. Например, построение новой математической модели анализа надежности СОТР ТГК «Прогресс»: дерева отказов (ДО).

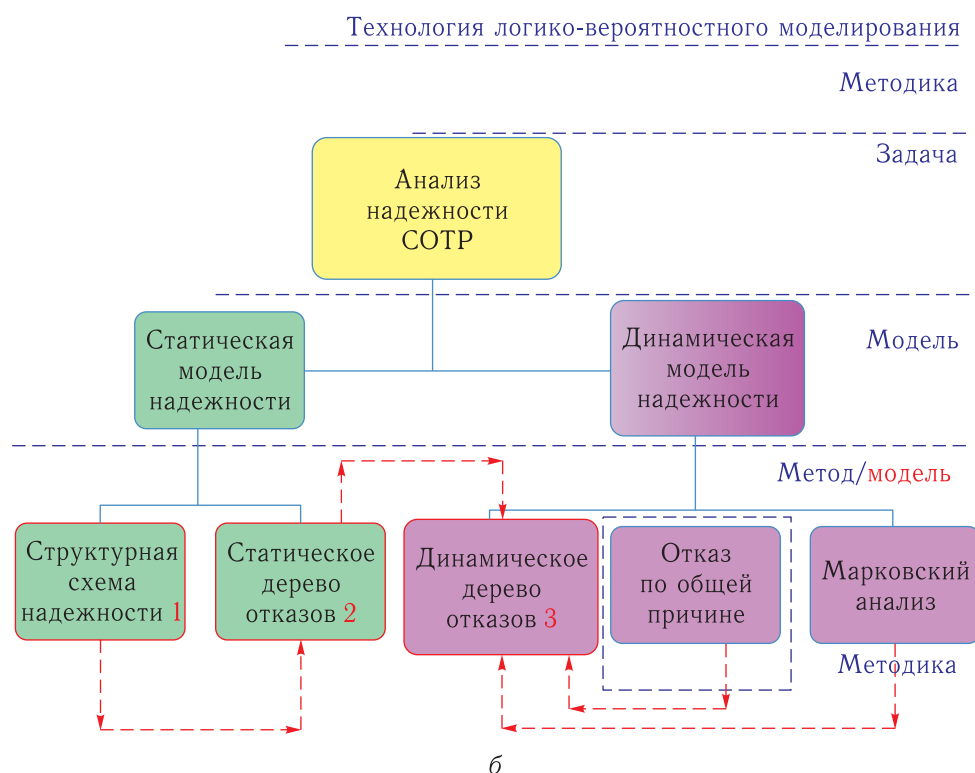
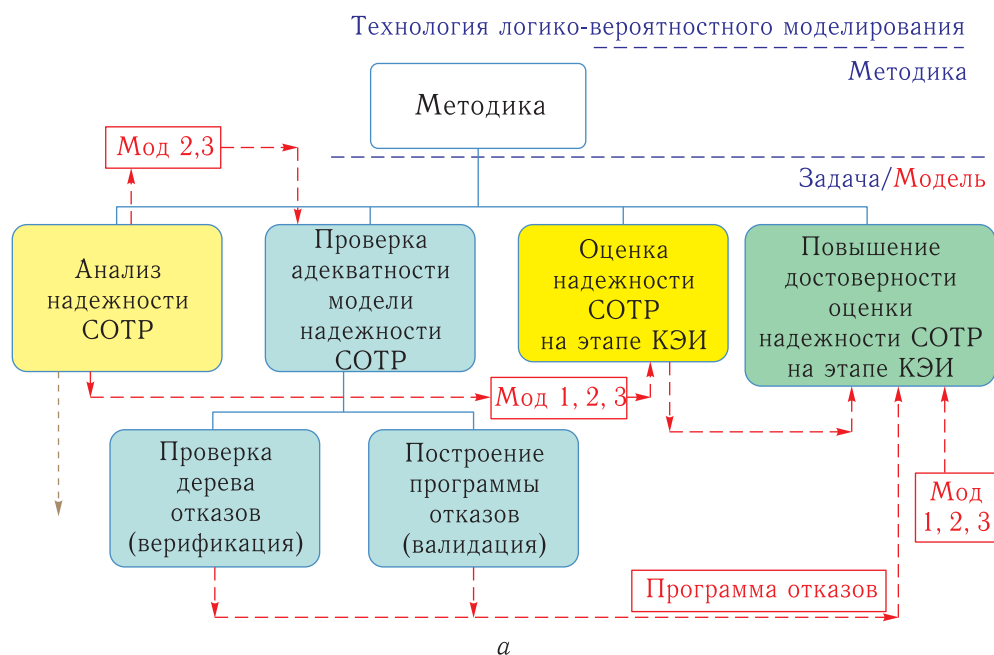


Рис. 1. Структура «Методики» и схема реализации моделей надежности в общей структуре целевых задач:  
 а — структура «Методики повышения достоверности оценок надежности СОТР ТГК «Прогресс» на этапе КЭИ»,  
 б — структура задачи «Анализ надежности СОТР»

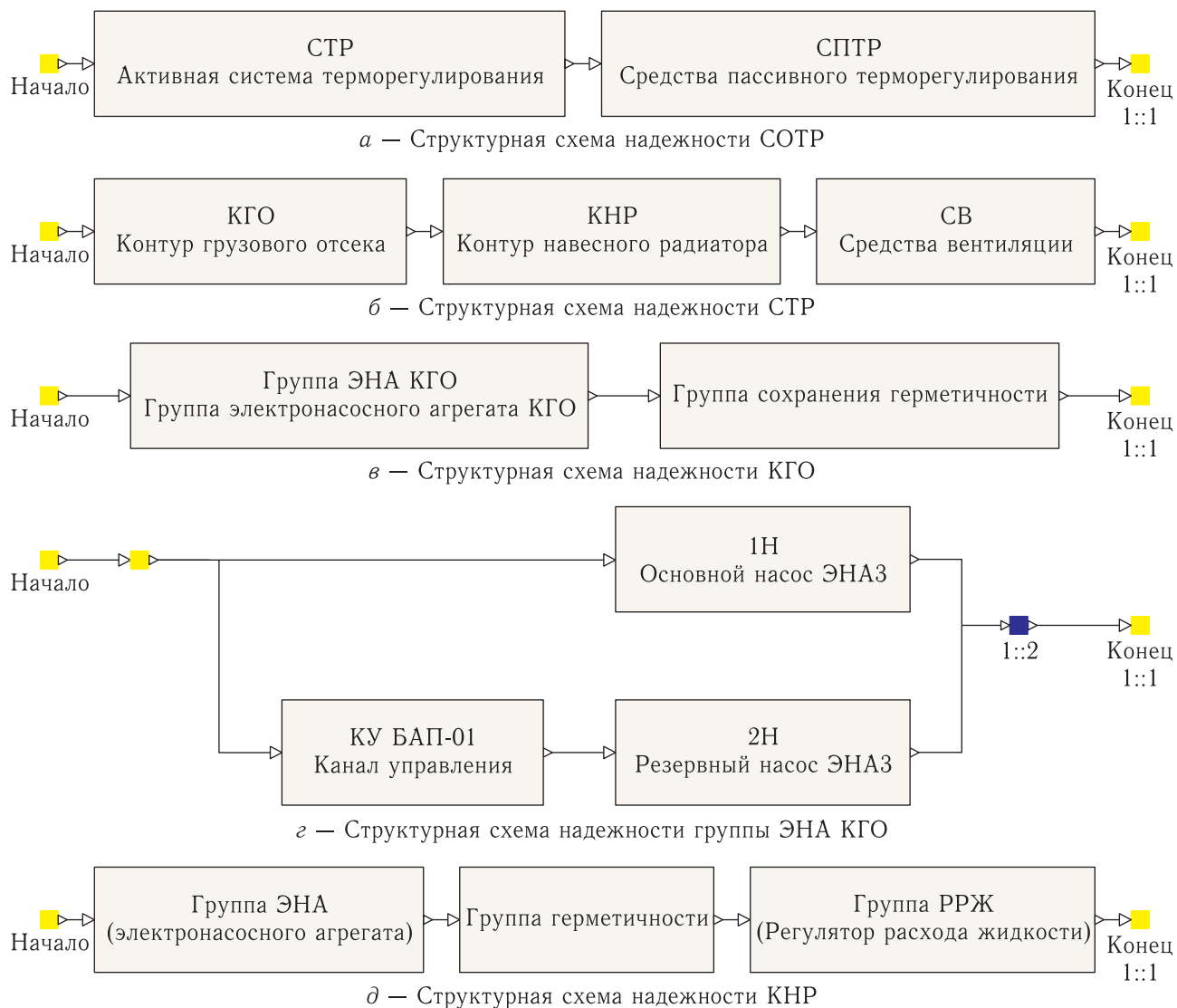


Рис. 2. Структурная схема надежности СОТР ТК «Прогресс»



– Результаты расчета RBD –  
Метод расчета: Аналитический

-- Результаты во время 720,00 --  
Надежность: 9,966781e-001  
Ненадежность: 3,321896e-003  
Доверительная вероятность: 95,00%  
Нижняя граница доверительного интервала надежности: 9,966781e-001  
Верхняя граница доверительного интервала надежности: 9,966781e-001

Рис. 3. Результаты аналитического расчета ВБР по методу ССН для СОТР ТК «Прогресс» на участке автономного полета 720 ч

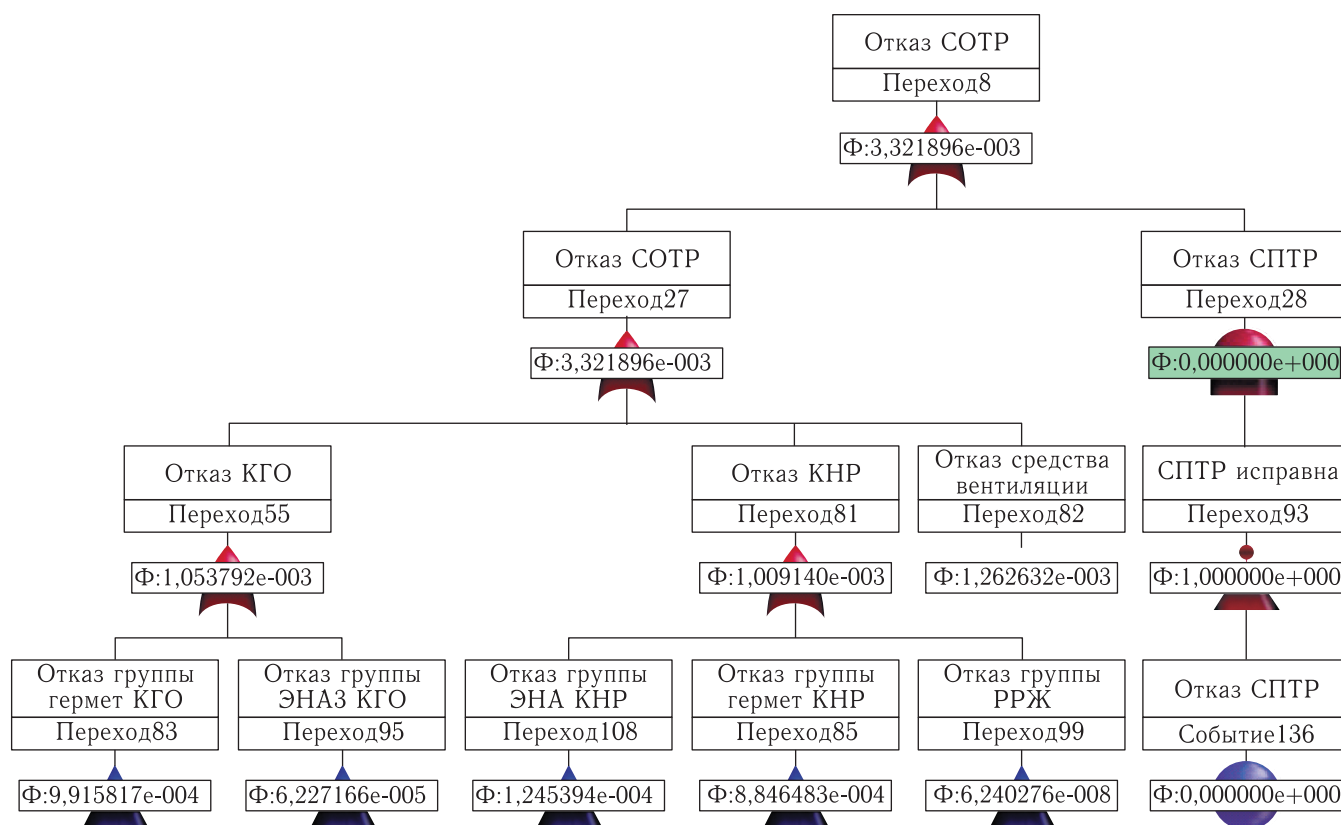


Рис. 4. Дерево отказов СОР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч

Эта модель разработана с использованием аналитического модуля FTA (Fault Tree Analysis — Анализ дерева отказов). ДО СОР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч приводится на рис. 4. Результаты моделирования показали, что разработанная модель ДО СОР ТГК «Прогресс» эквивалентна разработанной модели ССН СОР ТГК «Прогресс» по показателю (1-ВБР).

Результатом расчета по модели ССН является ВБР = «надежность» = 0,9966781. Из этого следует, что (1-ВБР) = «ненадежность» = 0,003321896 (см. рис. 3).

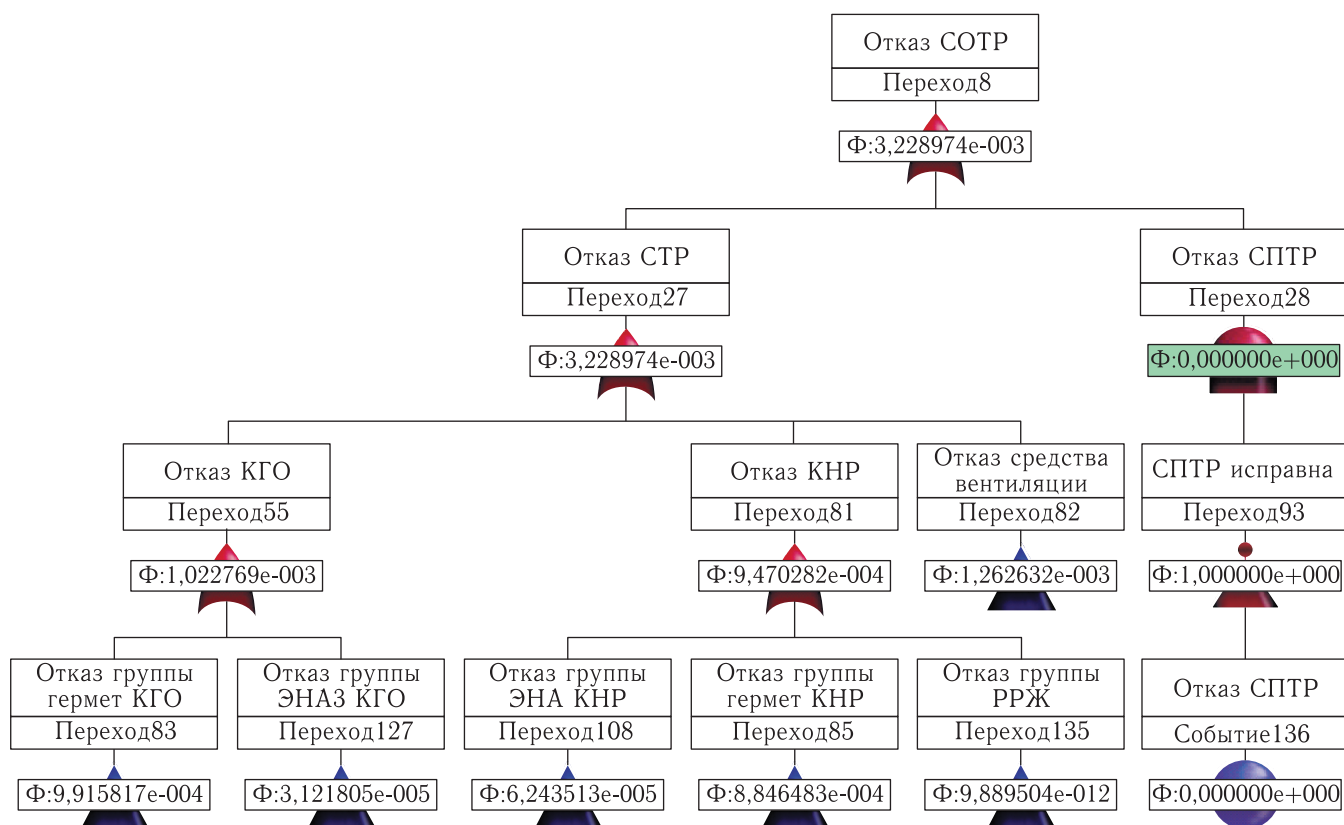
Результатом расчета по модели ДО является вероятность отказа  $\Phi = 0,003321896$  (см. значение в результирующем событии «Отказ СОР» на рис. 4). Таким образом, (1-ВБР) =  $\Phi$ .

Следует отметить, что отсутствие значимых дополнительных факторов, которые можно учесть только в модели ДО, приводит к недостоверной, часто завышенной оценке показателя ВБР. Напри-

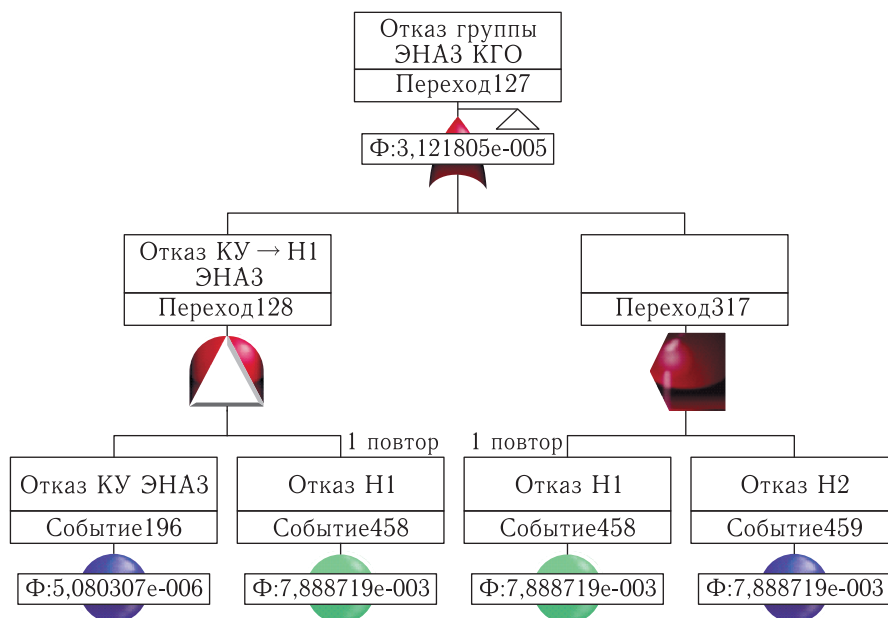
мер, показатель ВБР СОР ТГК «Прогресс», рассчитанный по методике отдела-разработчика методом ССН, больше на 3% аналогичного показателя, рассчитанного по автоматизированной методике (методом ДО), учитывающей особенности резервирования и динамики отказа некоторых функциональных звеньев.

Возможность построения динамической модели надежности с помощью Динамического дерева отказов (ДДО) обеспечивается введением в них четырех специальных вершин: «приоритетное И»: PAND (Priority AND Gate), «принудительная последовательность»: SEQ (Sequence Enforcing Gate), «резервирование»: SPARE (Spare Gate), «функциональная зависимость»: FDEP (Functional Dependency Gate) [7]. Общее ДДО СОР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч приводится на рис. 5, а.

ДДО отдельных звеньев СОР ТГК «Прогресс» на участке автономного полета 720 ч



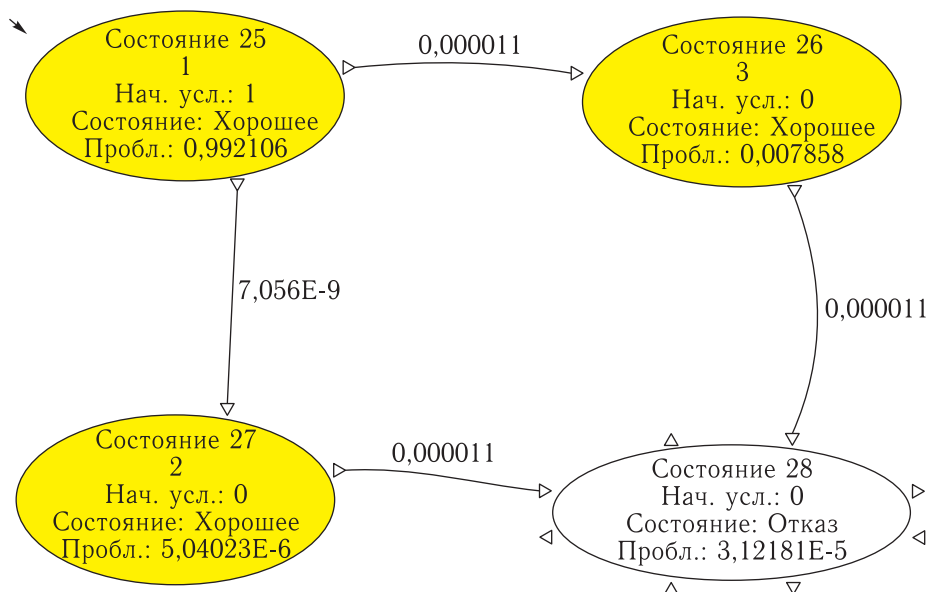
а — Общее Динамическое дерево отказов СОР ТГК «Прогресс»



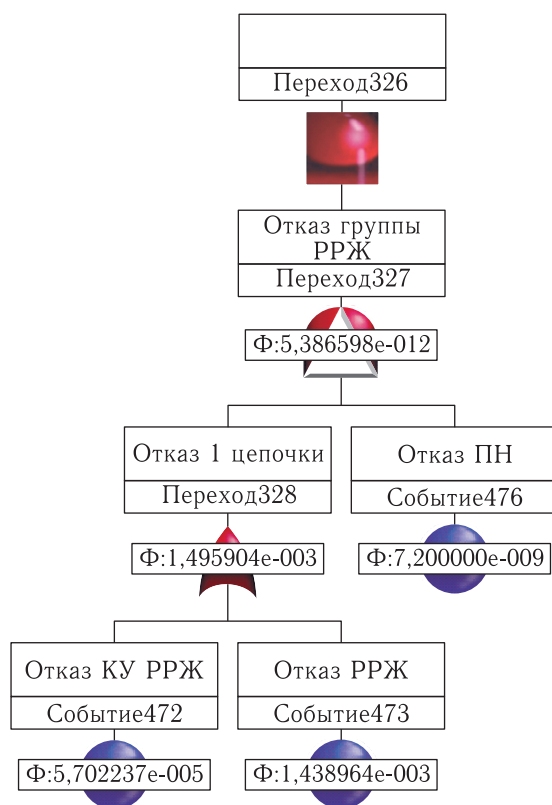
б — Динамическое дерево отказов группы ЭНАЗ КГО

Рис. 5. Динамическая модель надежности СОР ТГК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке автономного полета 720 ч





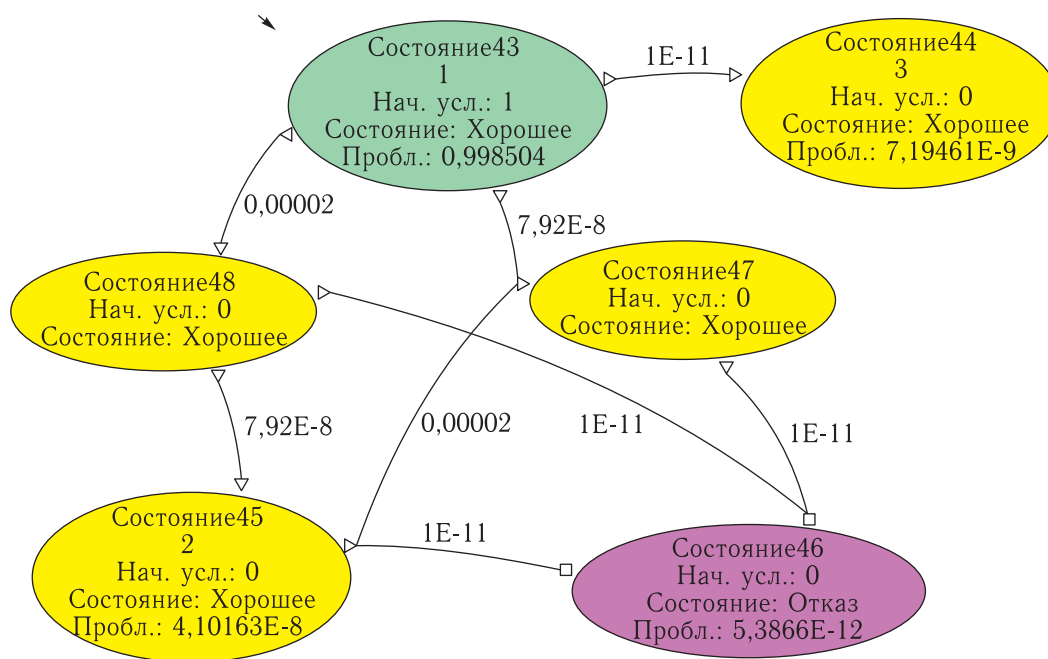
в — Марковская модель группы ЭНАЗ КГО, эквивалентная Динамическому дереву отказов ЭНАЗ КГО



г — Динамическое дерево отказов группы РРЖ

Рис. 5. Продолжение





д — Марковская модель группы РРЖ, эквивалентная Динамическому дереву отказов группы РРЖ

Рис. 5. Окончание

и эквивалентные им Марковские модели приведены на рис. 5, б–д.

Результаты для модели фазовой диаграммы надежности СОТР ТК «Прогресс» при продолжительности функционирования изделия до 200 сут (в том числе 30 сут автономного полета) приведены на рис. 6.

Результаты расчета показателей надежности СОТР ТК «Прогресс» трех фаз процесса электрических испытаний на ТК для расчета (1-ВБР) приведены на рис. 7.

## 2. Оценка надежности СОТР КА на этапе КЭИ

Объем КЭИ реализуется через последовательное решение частных задач, определяемых видом и этапом испытаний. Цель и задачи КЭИ достигаются выполнением всех установленных этапов испытаний: этап 1 — ЭИ на контрольной испытательной станции завода экспериментального машиностроения (КИС ЗЭМ); этап 2 — электрические испытания на техническом комплексе (ТК); этап 3 — подготовка изделия на стартовом комплексе (СК).

Необходимость введения этапов обусловлена требованиями общего технологического плана подготовки изделия и особенностями эксплуатации изделия на заключительных этапах подготовки. КЭИ предусматривают следующие виды испытаний: защитные операции изделия (ЗО); проверочные включения систем изделия (ПВ), комплексные испытания систем изделия (КИ); совместные испытания (СИ) с другими изделиями, входящими в состав орбитальной станции (только на 1 этапе, проводятся на комплексном стенде Международной космической станции (КС МКС)); заключительные операции перед отправкой на техническом комплексе (ТК).

Для успешного выполнения задачи комплексных электрических испытаний СОТР ТК «Прогресс» на этапе ТК необходимо успешное выполнение всех ее штатных проверок в каждой из трех последовательно выполняемых фаз: 1 фаза (5 ч) — старт (подготовка к работе); 2 фаза (95 ч) — работа; 3 фаза (5 ч) — пуск. В каждой фазе используется одно и то же оборудование СОТР ТК «Прогресс», соединенное в различные ССН. На рис. 8, а, б, в и г представлены примеры блок-схем надежности каждой из фаз.

Результаты для Фазовая СТР 4800:

|   | Этап   | Цикл | Время   | Средняя прод... | Надежность эт... | Надежность    | Ненадежность  |
|---|--------|------|---------|-----------------|------------------|---------------|---------------|
| 1 | Этап 1 | 1,00 | 720,00  | 7,200000e+002   | 9,966210e-001    | 9,966210e-001 | 3,379000e-003 |
| 2 | Этап 2 | 1,00 | 4800,00 | 4,080000e+003   | 9,769180e-001    | 9,736170e-001 | 2,638300e-002 |

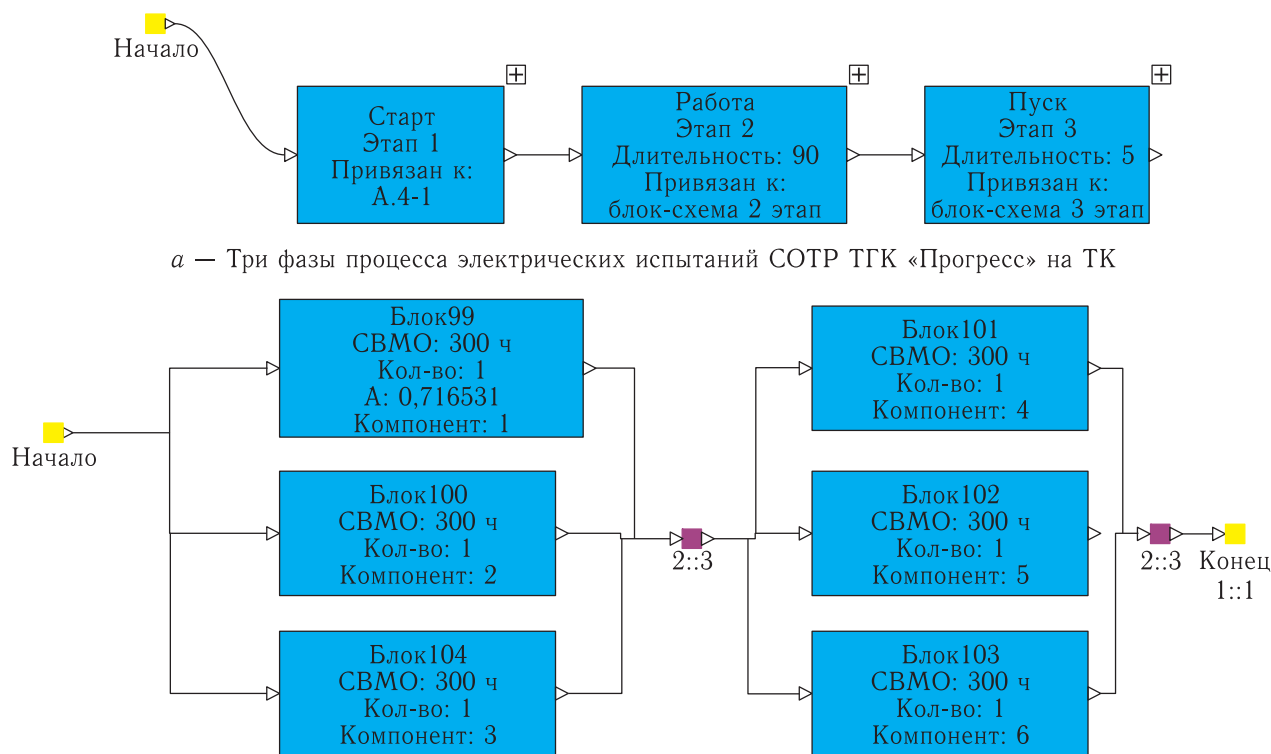
Рис. 6. Результаты расчета фазовой диаграммы надежности СОТР ТК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) на участке совместного полета 200 сут

## Результаты этапа

Результаты для Поэтапная схема ПРИМЕР Виктор:

|   | Этап   | Цикл | Время  | Средняя продолжительность | Надежность этапа | Надежность    | Ненадежность  |
|---|--------|------|--------|---------------------------|------------------|---------------|---------------|
| 1 | Этап 1 | 1,00 | 5,00   | 5,000000e+000             | 9,983800e-001    | 9,983800e-001 | 1,620000e-003 |
| 2 | Этап 2 | 1,00 | 95,00  | 9,000000e+001             | 9,376390e-001    | 9,361200e-001 | 6,388000e-002 |
| 3 | Этап 3 | 1,00 | 100,00 | 5,000000e+000             | 9,651220e-001    | 9,034700e-001 | 9,653000e-002 |

Рис. 7. Результаты расчета показателей надежности СОТР ТК «Прогресс» для расчета (1-ВБР) трех фаз процесса электрических испытаний на ТК

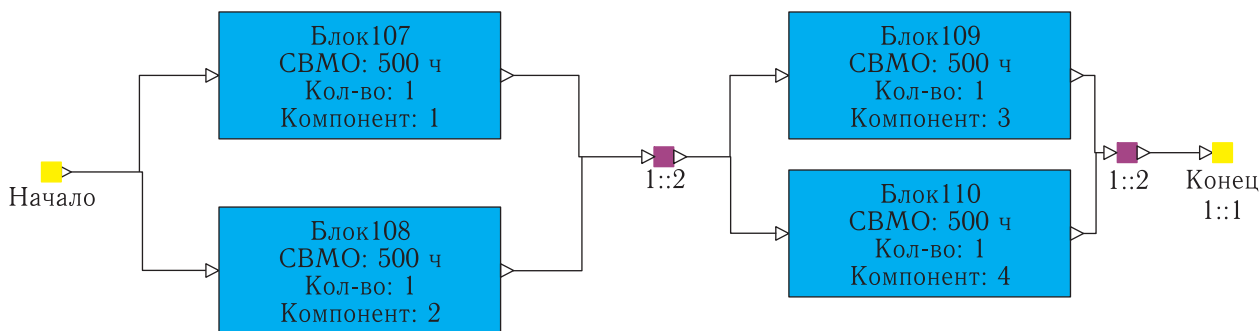


-- Результаты расчета RBD –  
Метод расчета: Аналитический

-- Результаты на момент времени 100,00 --  
Надежность: 6,472081e-001  
Ненадежность: 3,527919e-001  
Коэффициент готовности: 6,472081e-001  
Коэффициент простоя: 3,527919e-001

б — Блок-схема надежности фазы 1

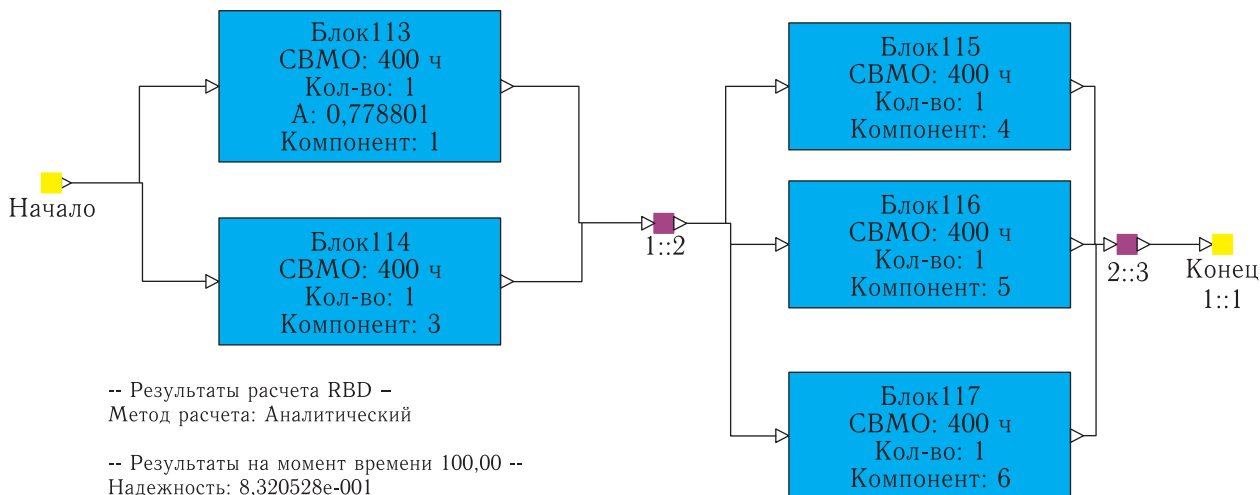
Рис. 8. Фазовая диаграмма



-- Результаты расчета RBD --  
Коэффициент готовности стационарного режима: 0e+000  
Метод расчета: Аналитический

-- Результаты на момент времени 100,00 --  
Надежность: 9,353626e-001  
Ненадежность: 6,46374e-002  
Коэффициент готовности: 9,353626e-001  
Коэффициент простоя: 6,46374e-002

в — Блок-схема надежности фазы 2



-- Результаты расчета RBD --  
Метод расчета: Аналитический

-- Результаты на момент времени 100,00 --  
Надежность: 8,320528e-001  
Ненадежность: 1,679472e-002  
Коэффициент готовности: 8,320528e-001  
Коэффициент простоя: 1,679472e-002

г — Блок-схема надежности фазы 3

Рис. 8. Окончание

На рис. 8 также представлены результаты моделирования фазовой диаграммы для времени испытаний 100 ч.

### 3. Марковская модель процесса биномиальных испытаний (Markov)

Результаты расчета ПН на разработанных Марковских моделях СОТР ТКГ «Прогресс» (на при-

мере основного насоса ЭНАЗ КГО) в модуле Markov представляют собой вероятность состояния (отказ или работа) по результатам биномиальных испытаний. Агрегирование этих значений в общую динамическую модель системы дает расчетно-экспериментальную оценку надежности на момент времени, определенный заданным количеством испытаний системы. Результаты моделирования Марковской модели биномиальных испытаний (для 5 испытаний) представлены на рис. 8.

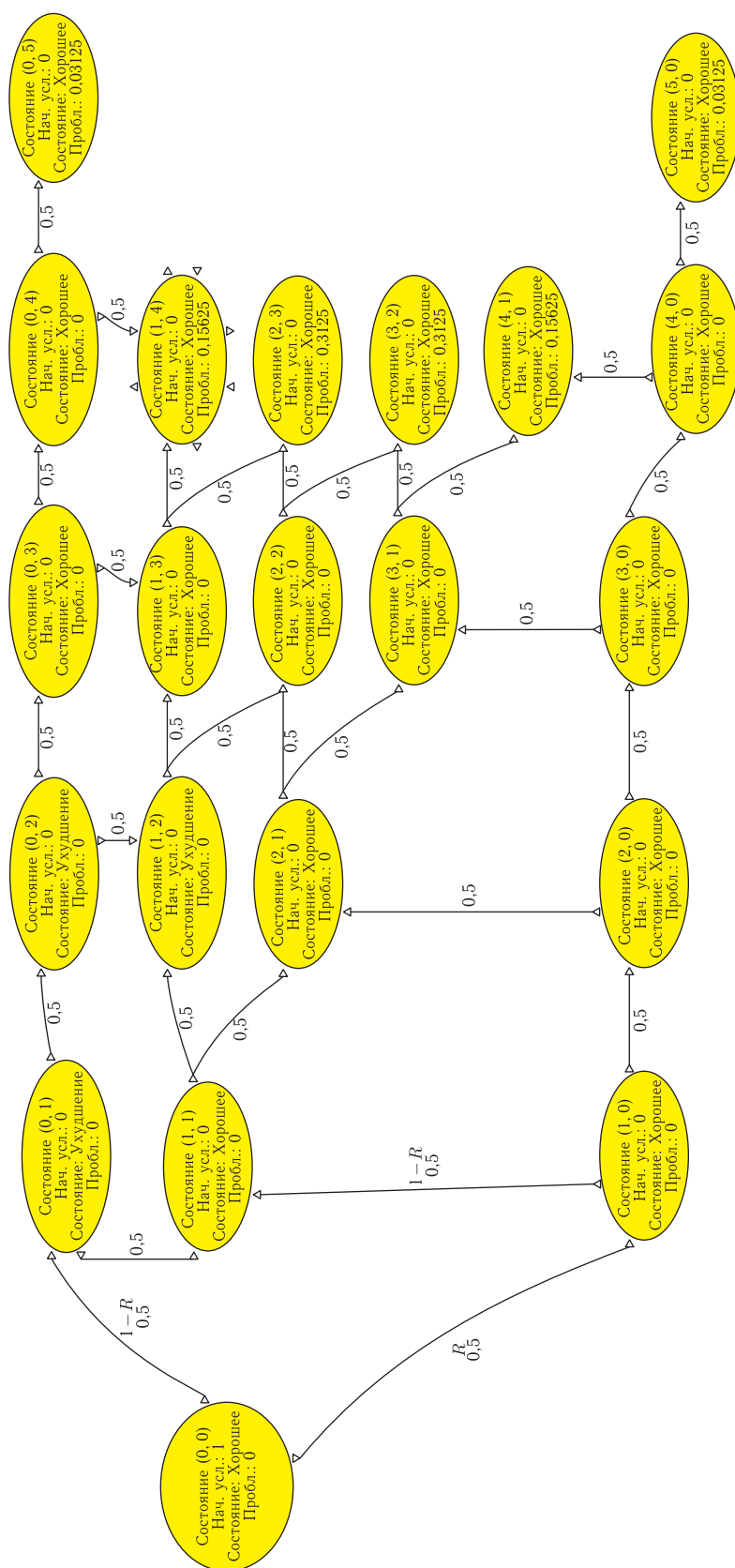


Рис. 9. Результаты расчета вероятности состояния (отказ или работа) по результатам биномиальных испытаний показателей надежности ЭНАЗ КГО СОТР ТК «Прогресс» для 5 испытаний

## Заключение

Приведенные результаты позволяют выдать рекомендации в задаче повышения достоверности оценки показателя на этапе наземных испытаний. Для задачи верификации системы на рассматриваемом этапе даются обоснованные рекомендации к построению программы-методики испытаний.

## Список литературы

1. Российское Космическое Агентство.  
<http://www.federalspace.ru> О работе Межведомственной комиссии по расследованию причин аварии РН «Протон-М». Дата обращения 15.12.2014.
2. Российское Космическое Агентство.  
<http://www.federalspace.ru> Основные положения Заключения Межведомственной комиссии по анализу причин нештатной ситуации, возникшей в процессе проведения летных испытаний космического аппарата «Фобос-Грунт». Дата обращения 15.12.2014.
3. Р 50-54-82-88. Рекомендации. Надежность в технике. Выбор способов и методов резервирования. М: Издательство стандартов, 1988. 46 с.
4. Relex 2011. Reference Manual. Relex Software Corporation 41 West Otterman Street, Greensburg, Pennsylvania 15601 USA, 2011. 3172 p.
5. Белова В.В. Моделирование надежности системы обеспечения теплового режима космического аппарата на этапе электрических испытаний // Надежность и качество сложных систем, 2013, №3, с. 31–40.
6. Белова В.В. Анализ и интерпретация результатов автоматизированного моделирования и расчета показателей надежности процесса комплексных электрических испытаний системы обеспечения теплового режима транспортного грузового корабля «Прогресс». В сб. Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ 2014). М.: Изд-во ИПУ РАН, 2014. С. 7553–7563.
7. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: Ленанд, 2014. 256 с.