

## Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем

Юрий Г. Зайко, ОАО «НИИ «Аргон», Москва, Россия, e-mail: zayko@argon.ru

Ларелла Н. Искандарова, ОАО «НИИ «Аргон», Москва, Россия

Александр В. Трахтомиров, Научно-производственное предприятие «Оберон», Харьков Украина



Юрий Г. Зайко



Ларелла Н.  
Искандарова



Александр В.  
Трахтомиров

**Резюме. Цель.** Для определения количественных оценок показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем применимы методы теории надежности, аналитические методы или имитационное моделирование. Рассматривается использование этих методов для систем различной сложности. Описывается комплекс имитационных программ «Диалог», разработанный для расчета показателей безотказности. **Методы.** Основным препятствием широкого использования метода имитационного моделирования для получения показателей надежности является большая трудоемкость создания таких моделей. Существующие программные средства для этого не вполне пригодны. Разработанный комплекс программ «Диалог» позволяет решить эту задачу. Это достигается тем, что программы имитационных моделей создаются автоматически на основе введенных исходных данных. Время создания модели в основном определяется временем их ввода. Автоматическое создание имитационных моделей основано на том принципе, что если поведение системы при отказах обуславливается только ее составом, связями между компонентами, критериями отказов и условиями подключения резервов, т.е. когда реакция системы на отказ ее компонента заранее однозначно определена, то возможно создание моделей с одинаковой структурой для систем с любыми конфигурациями. Это позволяет создать основу исходного текста модели, общую для всех имитационных моделей данного типа. Такая основа составляет неизменяемую часть модели, а данные, которые определяют специфику поведения конкретной системы при отказах, задаются в виде вставок в основной текст. **Результаты.** Описываемый комплекс программ предназначен для расчета показателей безотказности различных технических систем с помощью имитационных моделей и состоит из программы для описания моделируемой системы «Диалог-ОС», программы для синтеза моделей «Диалог-Синтез» и специальных подпрограмм, объединенных в отдельную библиотеку. Комплекс позволяет автоматически создавать специализированные имитационные модели резервированных систем, которые проходят статистические испытания, и на основе полученных результатов определяются показатели безотказности. С помощью комплекса «Диалог» могут быть получены следующие показатели безотказности: 1) вероятность безотказной работы за заданное время, 2) интенсивность отказов в конце заданного времени, 3) среднее время наработки до отказа, 4) данные для построения графика зависимости вероятности безотказной работы от времени, 5) данные для построения графика зависимости интенсивности отказов от времени. **Выводы.** Приводятся результаты расчетов, произведенных теоретическими методами и методом имитационного моделирования, которые показывают хорошее совпадение (относительная погрешность не более 1%). Комплекс программ «Диалог» позволяет с достаточной для практики точностью рассчитывать показатели безотказности резервированных радиоэлектронных систем любой сложности. Следует отметить, что комплекс «Диалог» позволяет создать имитационную модель надежности для резервированных радиоэлектронных систем, расчет характеристик безотказности которых теоретическими методами невозможен из-за их сложности.

**Ключевые слова:** резервированные системы, показатели надежности, теория надежности, имитационное моделирование.

**Формат цитирования:** Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н., Трахтомиров А.В. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем // Надежность. 2016. №3. С. 8-17. DOI: 10.21683/1729-2646-2016-16-3-8-17

### Теоретические методы расчета

Для повышения надежности функционирования радиоэлектронных систем (РЭС) при недостаточной надежности составляющих эти системы элементов используется резервирование, т.е. наличие в системе

большого количества элементов по сравнению с количеством, необходимым для выполнения требуемой функции (аппаратурная избыточность).

Среди показателей надежности, определяющих безотказность функционирования РЭС, чаще всего на практике используются следующие:

- вероятность безотказной работы (ВБР) за заданное время  $t - R(t)$ ;
- средняя наработка до отказа -  $T_0$ ;
- интенсивность отказов системы за заданное время  $t - \lambda(t)$ .

Аналитический анализ надежности системы при резервировании проводится обычно при следующих ограничивающих допущениях:

1. Отказы элементов резервированной системы являются простейшим потоком случайных событий.

2. Все основные и резервные элементы, входящие в одну резервированную систему, имеют одинаковую надежность.

3. Переключающие устройства не учитываются (реализуются программным путем или принимаются идеально надежными).

4. Ремонт резервированной системы в процессе ее функционирования не производится.

5. Все элементы системы могут существовать только в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном.

Структурная схема надежности (ССН) представляет собой графическое изображение работоспособного состояния системы. ССН показывает логическую связь функционирующих элементов (или объединяющих их блоков), необходимых для успешной работы системы. Для определения количественных оценок показателей безотказности на основе ССН применимы различные методы. В зависимости от вида ССН используют простые булевы методы, теорию марковских процессов и/или анализ дерева неисправностей. Вычисления могут быть сделаны с применением теоретических методов или моделирования Монте-Карло [1] (метод имитационного моделирования).

Простейшим вариантом является последовательная ССН, в которой для успешного функционирования системы необходима успешная работа (отсутствие отказа) каждого из  $m$  элементов схемы (рис. 1). Все элементы схемы находятся во включенном состоянии, интенсивность отказов  $i$ -го элемента схемы обозначим  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ). Вход ССН обозначен символом  $I$ , выход - символом  $O$ .

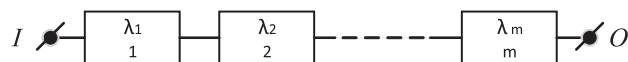


Рис. 1. Последовательная ССН из  $m$  элементов

При принятых выше допущениях основные количественные характеристики надежности последовательной ССН будут выражаться следующими формулами [2]:

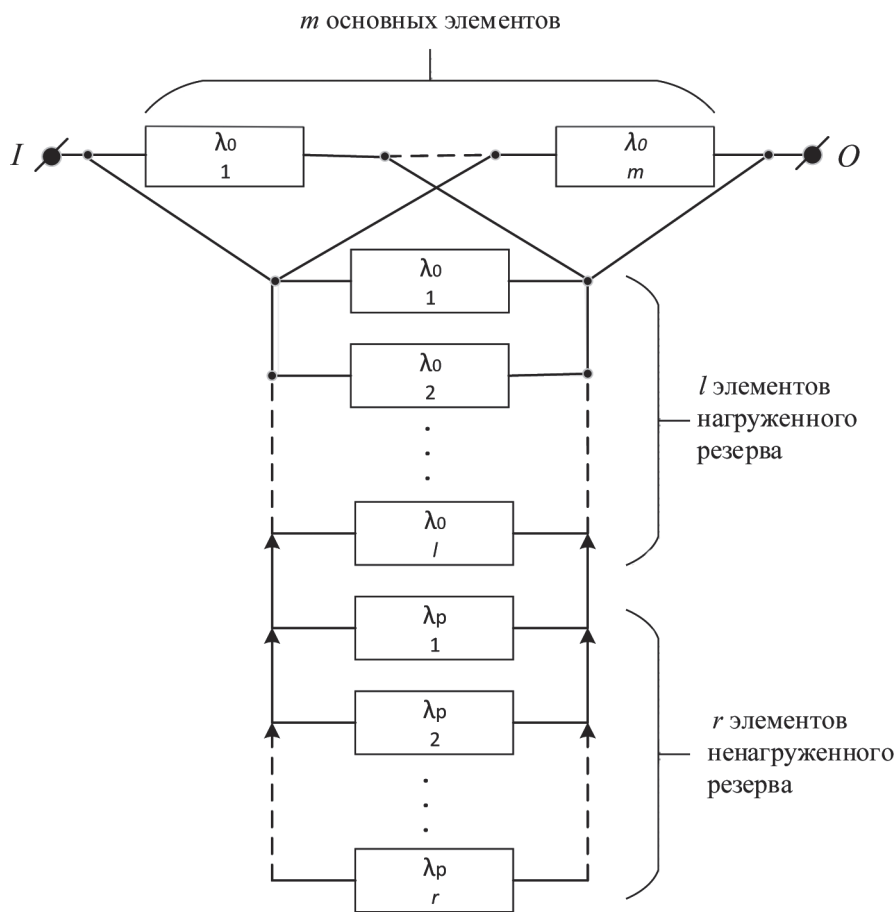


Рис. 2. Параллельная ССН со структурой  $(m, l, r)$

$$R_c(t) = e^{-t \sum_{i=1}^m \lambda_i}; \quad (1)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^m \lambda_i; \quad (2)$$

$$T_{0(c)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \lambda_i}. \quad (3)$$

Параллельная ССН может в общем случае содержать  $m$  основных элементов,  $l$  элементов нагруженного резерва и  $r$  элементов ненагруженного резерва. В частном случае, когда все основные элементы имеют одинаковую интенсивность отказов  $\lambda_0$ , все  $l$  элементов нагруженного резерва имеют такое же значение интенсивности отказов  $\lambda_0$ , все  $r$  элементов ненагруженного резерва находятся в выключенном состоянии и имеют до момента включения в работу интенсивность отказов  $\lambda_p$  ( $0 \leq \lambda_p < \lambda_0$ ), схема такого параллельного резервирования приведена на рис. 2. Будем обозначать структуру такой параллельной системы  $(m, l, r)$ .

В частном случае для структур с одним типом резерва  $(m, l, 0)$  и  $(m, 0, r)$  можно получить с использованием методов теории однородных марковских процессов следующую общую формулу для ВБР резервированной системы:

$$R_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \cdot \left[ \frac{\prod_{j=0}^n (m + j\alpha)}{\alpha^n \cdot n!} \sum_{i=0}^n (-1)^i \cdot \frac{C_n^i}{m + i\alpha} \cdot e^{-(m-1+i\alpha)\lambda_0 t} \right], \quad (4)$$

где  $n$  – число резервных элементов ( $n = l$  или  $n = r$ );  
 $m$  – число основных элементов ( $m \geq 1$ );

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{\lambda_0};$$

$$n! = \prod_{k=1}^n k - \text{факториал числа } n;$$

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!} - \text{число сочетаний из } n \text{ по } i.$$

Средняя наработка до отказа равна:

$$T_{0(c)} = \int_0^{\infty} R_c(t) dt = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^n \frac{1}{m + i\alpha}. \quad (5)$$

Интенсивность отказов резервированной схемы можно вычислить по формуле:

$$\lambda_c(t) = -\frac{R'_c(t)}{R_c(t)} = \lambda_0 \frac{\sum_{i=0}^n (-1)^i C_n^i e^{-(m+i\alpha)\lambda_0 t}}{\sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{C_n^i}{m + i\alpha} e^{-(m+i\alpha)\lambda_0 t}}. \quad (6)$$

В общем случае для систем со структурой  $(m, l, r)$ , включающей элементы как нагруженного, так и ненагруженного резерва, выражение для ВБР резервированной системы  $R_c(t)$  будет зависеть от режима подключения во включенное состояние элементов ненагруженного резерва. В частности, для систем, когда элементы ненагруженного резерва включаются в работу только после отказа  $l$  модулей из основного состава или нагруженного резерва, т.е. когда система приобретает структуру  $(m, 0, r)$ , выражение для  $R_c(t)$  имеет достаточно сложную структуру [3]. В простейшем случае для резервированной системы со структурой  $(1, l, 1)$  выражение для  $R_c(t)$  имеет следующий вид

$$R_c(t) = \left[ 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{l+1} \right] + (l+1) \cdot \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 t} \cdot \sum_{i=0}^l C_l^i (-1)^i \times \frac{\left[ 1 - e^{-(i+\alpha)\lambda_0 t} \right]}{\lambda_0 (i + \alpha)}. \quad (7)$$

Часто используемое на практике мажоритарное резервирование « $m$  из  $n$ » является частным случаем системы, приведенной на рис. 2, если структура будет иметь вид  $(m, l, 0)$  (в этом случае  $n = m + l$ ) или  $(m, 0, r)$  (в этом случае  $n = m + r$ ).

На практике нередко используются последовательно-параллельные схемы резервирования. На рис. 3 приведена схема, состоящая из нерезервированного элемента 1,

первой параллельной резервированной группы со структурой  $(1, 2, 0)$ , состоящей из элементов 2, 3, 4 и второй параллельной резервированной группы со структурой  $(1, 1, 0)$ , состоящей из элементов 5 и 6.

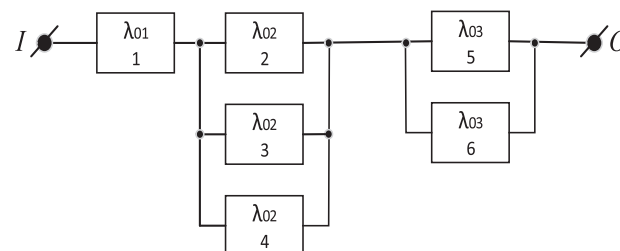


Рис. 3. ССН с последовательным и параллельным соединением элементов

Пример более сложной схемы с последовательно-параллельным резервированием изображен на рис. 4 [1].

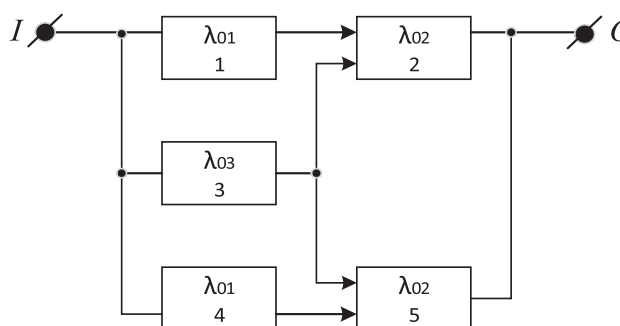


Рис. 4. ССН с последовательным и параллельным соединением элементов

На рисунке изображена система подачи топлива на двигателя легкого самолета. Элемент 1 представляет собой устройство подачи топлива на двигатель левого борта (элемент 2), элемент 4 – на двигатель правого борта (элемент 5), а элемент 3 – резервное устройство на оба двигателя. Отказ данной системы наступает в случае отказа обоих двигателей.

На схеме рис. 4 элементы 1, 3, 4 являются управляющими, а элементы 2, 5 – управляемыми. Связи управляющих элементов с управляемыми обозначены стрелкой.

Более сложная схема с управляющими и управляемыми элементами изображена на рис. 5 [4].

Схема состоит из управляющих элементов  $Y_1, Y_2, Y_3$  и рабочих элементов, объединенных в три линейки с последовательно-параллельным резервированием. Каждый управляющий элемент управляет своей линейкой рабочих элементов, причем отказ управляющего элемента выводит из строя всю линейку. Такая система резервирования используется в блоке оптических датчиков, входящих в блок регистрации грозовой активности, используемый в составе космического аппарата.

На практике могут использоваться схемы с многоуровневым резервированием (рис. 6).

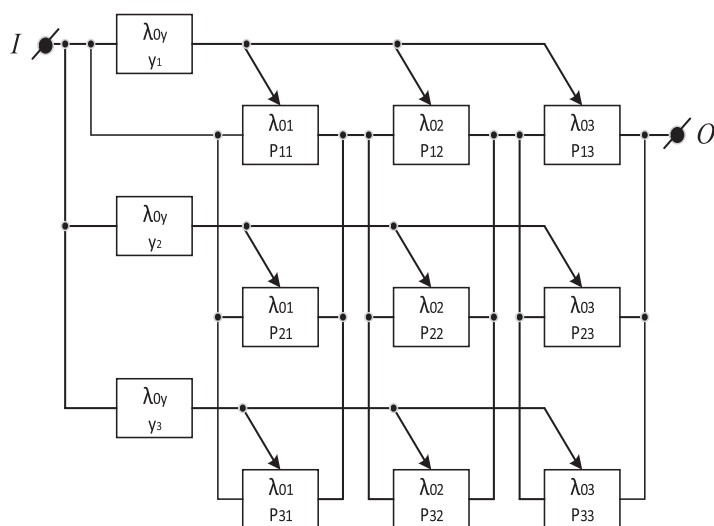


Рис. 5. ССН с управляющими и рабочими (управляемыми) элементами резервирования

В схеме, изображенной на рис. 6, на первом уровне резервирования используется мажоритарная схема «2 из 3» со структурой (2, 1, 0), на втором уровне – параллельная схема с ненагруженным резервом.

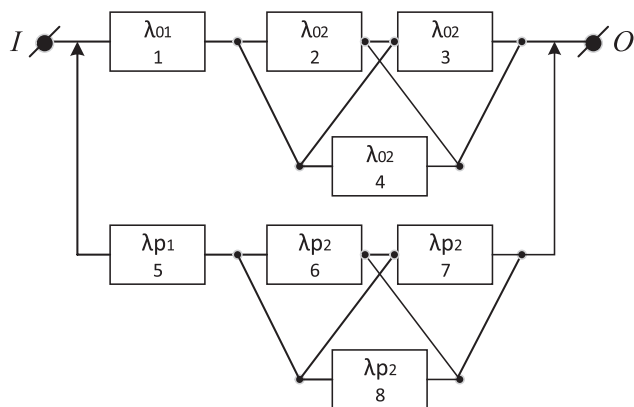


Рис. 6. ССН с двухуровневым резервированием

Анализ показывает, что для простейших схем резервирования (рис. 2) существуют готовые теоретические формулы для расчета показателей  $R(t)$ ,  $T_0$ ,  $\lambda(t)$  [1, 2]. Для более сложных схем (рис. 4, 5) методом анализа дерева неисправностей можно получить формулы для расчета показателей  $R(t)$  [1, 4], однако расчет показателей  $T_0$ ,  $\lambda(t)$  является проблематичным, поскольку такие схемы теряют свойство простейшего потока отказов.

Для схемы, приведенной на рис. 6, проблематичным является даже расчет показателя  $R(t)$ , поскольку для схемы второго уровня с ненагруженным резервированием для расчета показателя  $R(t)$  по известным формулам необходимо знать значение показателя  $\lambda(t)$  для каждой из линеек. Поскольку в каждую из линеек входит резервированная схема первого уровня, то поток отказов в линейках перестает быть простейшим и интенсивность отказов каждой линейки нельзя рассчитать по известным формулам.

Альтернативой теоретическим методам расчета показателей надежности является метод имитационного моделирования, который позволяет имитировать реальное функционирование резервированной системы любой сложности. Ниже описывается комплекс программ для имитационного моделирования, используемый для расчета показателей надежности резервированных систем.

### Описание комплекса программ «Диалог»

Основным препятствием широкого использования метода имитационного моделирования для получения показателей надежности является большая трудоемкость создания таких моделей. Существующие программные средства для этого не вполне пригодны.

Разработанный комплекс программ «Диалог» позволяет решить эту задачу. Это достигается тем, что программы имитационных моделей создаются автоматически на основе введенных исходных данных. Время создания модели в основном определяется временем их ввода.

Автоматическое создание имитационных моделей основано на том принципе, что если поведение системы при отказах обуславливается только ее составом, связями между компонентами, критериями отказов и условиями подключения резервов, т.е. когда реакция системы на отказ ее компонента заранее однозначно определена, то возможно создание моделей с одинаковой структурой для систем с любыми конфигурациями.

Это позволяет создать основу исходного текста модели, общую для всех имитационных моделей данного типа. Такая основа составляет неизменную часть модели, а данные, которые определяют специфику поведения конкретной системы при отказах, задаются в виде вставок в основной текст.

Исходными данными для синтеза моделей служат следующие сведения:

- состав системы и связи между ее компонентами;
- критерии отказов;
- условия подключения резервов;
- интенсивности отказов элементов системы в различных режимах.

Этих сведений достаточно для отражения в модели поведения системы при отказах.

В дальнейшем изложении будут использованы следующие термины:

- система – объект моделирования, для которого выполняется определение показателей надежности и который состоит из элементов и блоков;
- элемент – наименьшая неделимая часть системы, в которой происходит отказ;
- блок – условное объединение элементов и блоков;
- компоненты системы – элементы и блоки, входящие в ее состав;



- основной комплект системы – элементы и блоки системы, исключая подключаемый резерв и управляющие компоненты;
- подключаемый резерв – компоненты, подключаемые из резерва при появлении специальных условий;
- критерий отказа – состояние компонента, когда происходит его отказ;
- условие подключения резерва – условие, когда происходит замена отказавшего компонента на компонент из резерва.

Перед началом запуска программы «Диалог» должна быть выполнена подготовка части исходных данных, описывающих состав системы и связи между ее компонентами.

Подготовка таких данных заключается в выделении в системе условных блоков и присвоении имен всем блокам и элементам.

Для этого используются следующие типы блоков:

- последовательный (POSL) (рис. 1);
- параллельный (PAR) (рис. 2);
- мажоритарный (MAJ), являющийся частным случаем параллельного блока;
- управляемый (UPR) (рис. 5), состоящий из управляющих элементов (У1, У2, У3) и объектов управления (ОП), куда входят все рабочие компоненты ( $P_{11}, \dots, P_{33}$ );
- блок резерва (REZ) (рис. 2), который используется для выделения компонентов ненагруженного резерва при любом значении  $m$  и выделения компонентов нагруженного резерва при  $m > 1$ .

Ниже рассмотрена программа «Диалог» и принципы работы полученных с ее помощью имитационных моделей. Программа написана на языке REXX с использованием интерпретатора Regina 3.6. В состав комплекса также входят служебные файлы и специальные подпрограммы, объединенные в библиотеку, которые используются при трансляции.

На первом этапе работы программы оператором вводятся исходные данные, описывающие систему и режим испытаний. На втором этапе в результате обработки введенных данных выполняется синтез модели, которая представляет собой исходный текст компьютерной программы на языке Фортран 77 с использованием некоторых подпрограмм языка SMPL [5].

Структурная схема программы «Диалог» изображена на рис. 7, где приведены основные этапы работы программы.

Описание структурных элементов на рис. 7:

1. Ввод названия модели, времени создания, имени оператора и пути сохранения рабочих файлов. Название модели будет именем файла с записью модели.

2. Ввод состава системы: перечень элементов и условных блоков с указанием их типов.

3. Если у блока или элемента есть выключенные резервы, то вводится имя блока, где они хранятся.

4. Вводится состав условных блоков, в том числе блока хранения резерва.

5. Вводятся интенсивности отказов элементов для включенного и выключенного состояния.

6. Вводятся данные для испытания модели: число испытаний, время моделирования, включение расчета лямбда-характеристики. Эти данные могут быть изменены во время запуска программы модели.

7. Синтез модели. Обрабатываются введенные данные и формируются фрагменты текста модели. Неизменяемые части, составляющие основу модели, объединяются со сформированными фрагментами. Результатом объединения является текст программы на языке Фортран 77 и рабочие файлы.

8. Сохранение исходных данных. Чтобы сократить время ввода исходных данных, если необходимо испытать несколько вариантов систем, предусмотрено со-

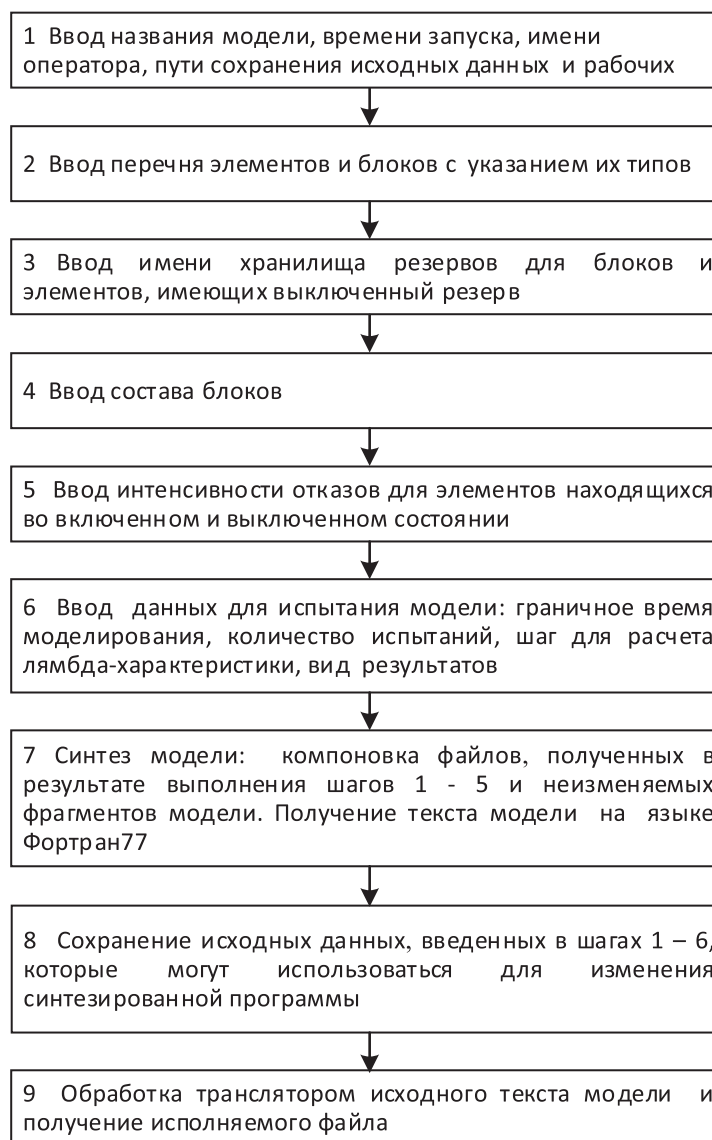


Рис. 7. Структурная схема программы «Диалог»

хранение введенных данных, возможность их частично изменить и синтезировать новую модель.

9. Трансляция сформированного текста программы и получение исполняемого файла. Для запуска трансляции необходим установленный транслятор, поддерживающий Фортран 77. Выбор этого языка обусловлен тем, что после трансляции формируется исполняемый код с небольшой избыточностью по сравнению с другими языками. Трансляция и испытания модели могут быть выполнены на другом компьютере.

Все полученные модели имеют одинаковый алгоритм работы и отличаются между собой только частями, описывающими структуру системы. Поэтому в дальнейшем изложении для них будет использовано общее название «модель».

Полученные модели имеют следующие характеристики:

- количество компонентов в системе – не более 100;
- закон распределения генерируемых событий – экспоненциальный;
- одно хранилище резервов может обслуживать несколько компонентов;
- компонент может обслуживаться только одним резервом;
- резервом компонента может быть компонент другого типа, т.е. резервом элемента может быть блок и наоборот;
- не предусмотрен резерв для компонентов, находящихся в резерве;
- критерий подключения резерва – отказ компонента.

В программе «Диалог» можно задать в качестве получаемых результатов следующие показатели надежности:

- значение вероятности безотказной работы за заданное время  $t - R(t)$ ;
- график зависимости  $R(t)$  для заданного интервала времени от  $t_{1(R)}$  до  $t_{2(R)}$ ;
- значение средней наработки до отказа –  $T_0$ ;
- значение интенсивности отказов системы за заданное время  $t - \lambda(t)$ ;
- график зависимости  $\lambda(t)$  для заданного интервала времени от  $t_{1(\lambda)}$  до  $t_{2(\lambda)}$  (лямбда-характеристика).

Принцип работы синтезированных моделей заключается в следующем:

1. При запуске программы для каждого элемента случайным образом генерируется время его отказа. Если это время меньше, чем заданное время окончания работы системы, то планируется событие – отказ элемента. В качестве параметра события задается время его наступления и имя элемента, к которому относится это событие. Генерируется также событие прекращения работы модели при наступлении времени окончания работы системы.

2. События заносятся в очередь и сортируются по возрастанию времени.

3. Опрашивается очередь и выбирается событие с минимальным временем.

4. Для выбранного события (отказа элемента) выполняется его обработка: опрашиваются компоненты системы, определяется, привел ли этот отказ к отказу других компонентов или отказу системы, возможно ли подключение резерва.

5. Если достигнуто граничное время или произошел отказ системы, то работа модели прекращается.

6. В случае подключения резерва вместо отказавшего компонента, резерв переводится во включенное состояние, отменяются ранее запланированные для него события и генерируются новые отказы для включенного состояния.

7. Запуск модели повторяется заданное число раз, после чего выполняется расчет показателей надежности.

Для дальнейшего изложения следует учесть, что в модели используется следующее разбиение событий на группы (транзакты) в соответствии с их видом и алгоритмом обработки:

- отказы включенных элементов (транзакт 1);
- отказы выключенных элементов резерва (транзакт 2);
- завершение работы при достижении времени окончания моделирования (транзакт 3).

Результатом работы программы «Диалог» является файл (Имя модели).for с записью модели на языке Фортран. После его трансляции формируется исполняемый файл (Имя модели).exe. Далее выполняется его запуск и проводятся статистические испытания.

Структурная схема, демонстрирующая работу таких моделей, изображена на рис. 8.

Работа происходит следующим образом:

1. Запуск исполняемого файла, полученного после трансляции.

2. Установка начальных условий. Устанавливается время моделирования, число запусков при испытании модели, шаг для расчета лямбда-характеристики. Эти данные можно изменить при выполнении программы, а также исключить расчет лямбда – характеристики.

3. Формируется список элементов и условных блоков.

4. Генерируются события отказов включенных элементов (транзакт 1) и выключенных элементов резерва (транзакт 2). События отказов заносятся в очередь событий и сортируются по запланированному времени свершения. Заносится в очередь событие окончания моделирования (транзакт 3).

5. Опрашивается очередь событий. Выбирается ближайшее по времени свершения событие. В зависимости от номера транзакта, выполняется переход к обработке отказов включенных элементов основного комплекта, обработке отказов выключенных элементов резерва или к окончанию работы модели.

6. Обработка отказа элемента основного комплекта. Проверяется, привел ли отказ этого элемента к отказу системы. Так как элемент может находиться одновременно в нескольких условных блоках, то проверяется,

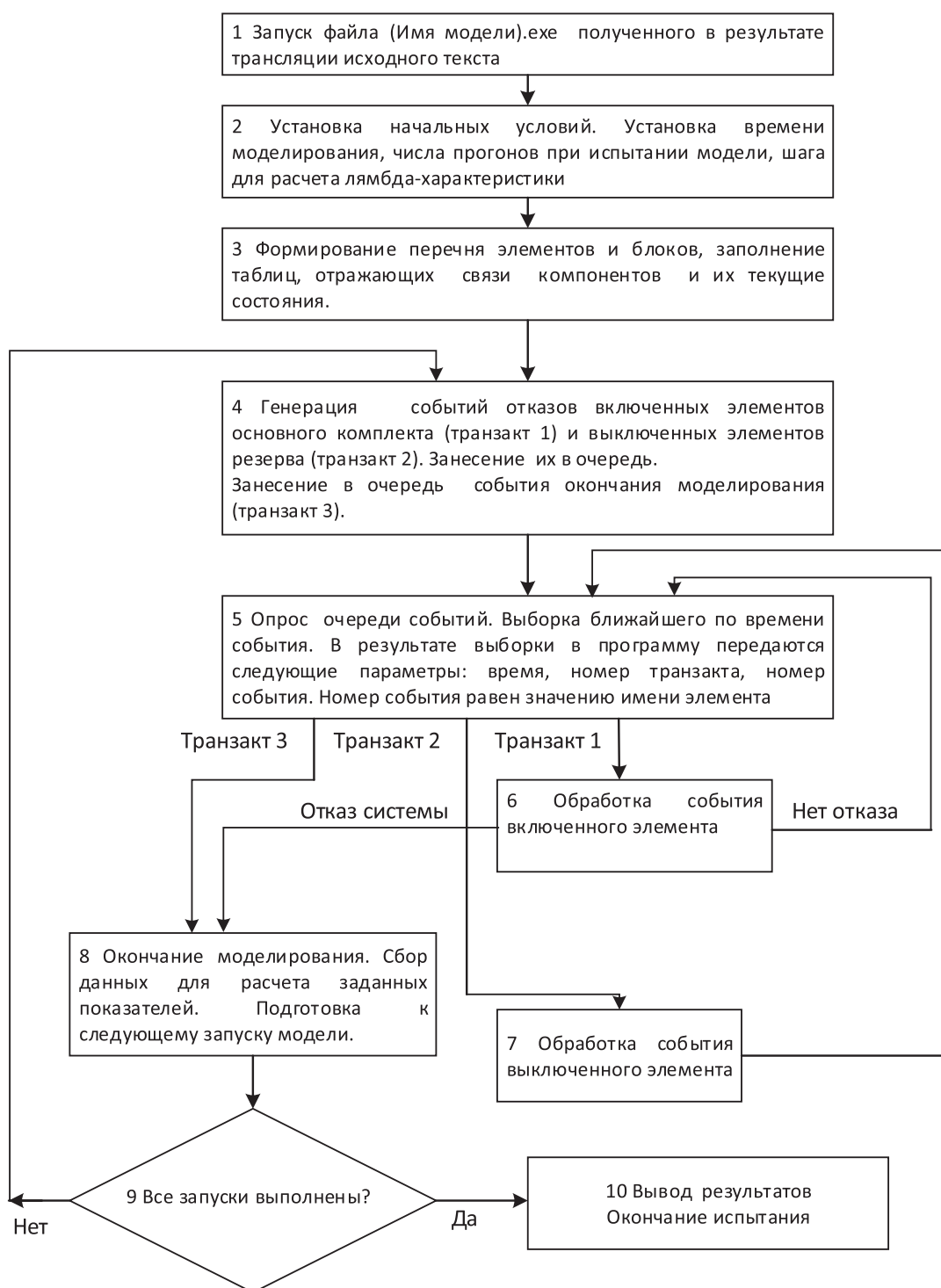


Рис. 8. Структурная схема программы имитационной модели

к чему привел его отказ в этих блоках. В свою очередь, отказ каждого блока может привести к отказу других блоков и т.д. до достижения последнего блока. В случае, если отказавший блок или элемент имеет резерв, выполняется его замещение компонентом из резерва. Если произошел отказ системы, в счетчик отказов прибавляется единица и работа модели прекращается. После выполнения обработки отказа выбирается очередное событие из очереди.

7. Обработка отказа элемента выключенного резерва происходит так же, как описано в пункте 6, за исключением возможности подключения резерва и отсутствия отказа устройства.

8. Заканчивается работа модели по двум причинам: достижение граничного времени при отсутствии отказа или отказ системы.

9. Если не достигнуто заданное количество запусков модели, происходит переход к блоку 4 и

МОДЕЛЬ RIS2-1  
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
время моделирования= 1000  
число испытаний= 200000  
число отказов= 50529  
число успехов= 149471  
вероятность  
безотказной работы=.7473550  
среднее время  
наработки до отказа= НЕ РАССЧИ-  
ТЫВАЛОСЬ  
шаг= 50  
интенсивность  
отказов  $\lambda(t) = .00058785$

Рис. 9. Результаты испытания модели

МОДЕЛЬ RIS2-1  
ВЫПОЛНЕН РАСЧЕТ СРЕДНЕГО  
ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА  
время моделирования= 300000  
число испытаний= 200000  
число успехов= 0  
среднее время наработки  
до отказа= 1834,26

Рис. 10. Результаты испытания модели для получения среднего времени наработки до отказа

повторный запуск. При каждом завершении работы собираются данные для получения результатов моделирования.

10. Если выполнено заданное количество запусков, выводятся результаты.

ДАННЫЕ ГРАФИКА ИНТЕНСИВНОСТИ  
ОТКАЗОВ  $\lambda(t)$

| шаг | время | $\lambda(t)$ |
|-----|-------|--------------|
| 1   | 25    | 0.279248E-05 |
| 2   | 75    | 0.177235E-04 |
| 3   | 125   | 0.357058E-04 |
| 4   | 175   | 0.651742E-04 |
| 5   | 225   | 0.105678E-03 |
| 6   | 275   | 0.140588E-03 |
| 7   | 325   | 0.174245E-03 |
| 8   | 375   | 0.204881E-03 |
| 9   | 425   | 0.241084E-03 |
| 10  | 475   | 0.279565E-03 |
| 11  | 525   | 0.318051E-03 |
| 12  | 575   | 0.355583E-03 |
| 13  | 625   | 0.384560E-03 |
| 14  | 675   | 0.411543E-03 |
| 15  | 725   | 0.441098E-03 |
| 16  | 775   | 0.482188E-03 |
| 17  | 825   | 0.510980E-03 |
| 18  | 875   | 0.536080E-03 |
| 19  | 925   | 0.549788E-03 |
| 20  | 975   | 0.572966E-03 |

Рис. 11. Данные графика интенсивности отказов  $\lambda(t)$ 

ДАННЫЕ ГРАФИКА ВЕРОЯТНОСТИ  
БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ  $R(t)$

| шаг | время | $R(t)$       |
|-----|-------|--------------|
| 1   | 50    | 0,999710E+00 |
| 2   | 100   | 0,999125E+00 |
| 3   | 150   | 0,997345E+00 |
| 4   | 200   | 0,994370E+00 |
| 5   | 250   | 0,989405E+00 |
| 6   | 300   | 0,981660E+00 |
| 7   | 350   | 0,973620E+00 |
| 8   | 400   | 0,963880E+00 |
| 9   | 450   | 0,951950E+00 |
| 10  | 500   | 0,939040E+00 |
| 11  | 550   | 0,924295E+00 |
| 12  | 600   | 0,907600E+00 |
| 13  | 650   | 0,890265E+00 |
| 14  | 700   | 0,872485E+00 |
| 15  | 750   | 0,853265E+00 |
| 16  | 800   | 0,833265E+00 |
| 17  | 850   | 0,811605E+00 |
| 18  | 900   | 0,790305E+00 |
| 19  | 950   | 0,768880E+00 |
| 20  | 1000  | 0,747355E+00 |

Рис. 12. Данные графика вероятности безотказной работы  $R(t)$ 

В качестве примера работы программы «Диалог» ниже приведены результаты моделирования ССН, показанной на рис. 2 со структурой (1,2,0).

Пример вывода результатов испытания модели показан на рис. 9.

Для получения достоверного значения среднего времени наработки до отказа испытания модели выполняются со временем моделирования, обеспечивающим вероятность безотказной работы, близкую к 0. Обычно достаточно устанавливать время равным  $(1/\lambda) \times 20$ , где  $\lambda$  – наименьшее значение из показателей  $\lambda$  для элементов, входящих в состав ССН.

Пример результатов такого расчета показан на рис. 10

Результаты испытаний в виде таблиц показаны на рис. 11-12.

Графики изменений интенсивности отказов  $\lambda(t)$  и вероятности безотказной работы  $R(t)$  показаны на рис. 13-14. Для построения графиков использовалась программа, не входящая в состав комплекса «Диалог».

## Оценка полученных результатов

Для сертификации результатов работы комплекса программ «Диалог» была проведена сравнительная оценка расчетов показателей надежности резервированных систем, проведенных теоретическими методами по известным формулам, и полученных в результате работы имитационной модели. Результаты расчетов приведены в таблице 1.



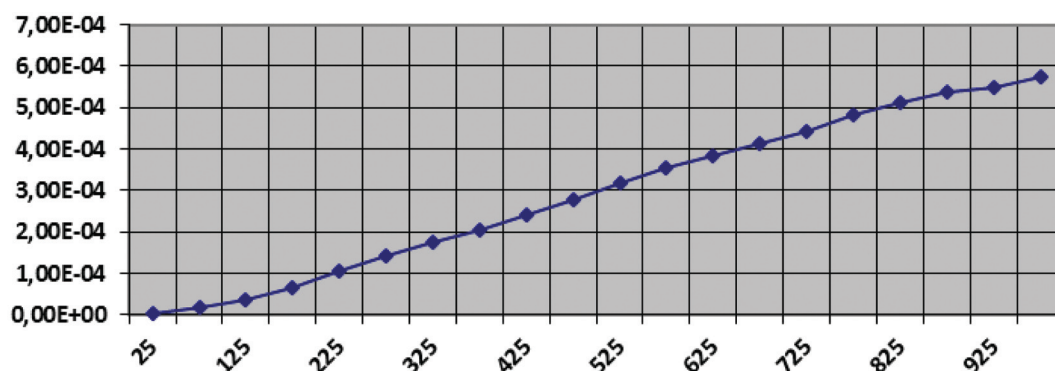
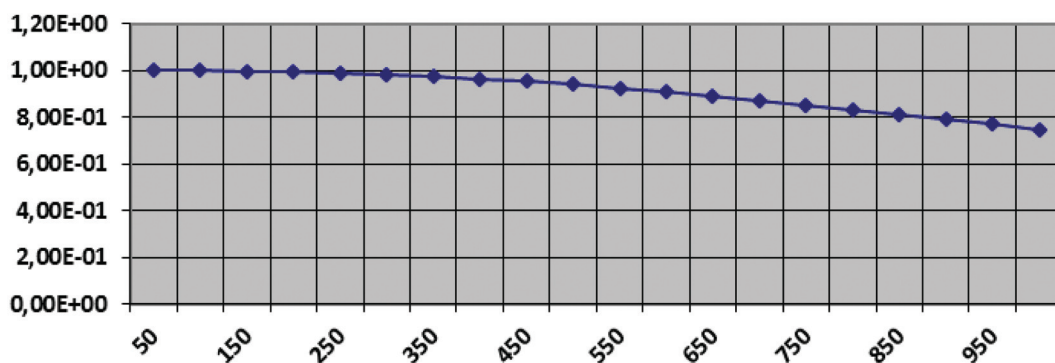
Рис. 13. График  $\lambda(t)$ Рис. 14. График  $R(t)$ 

Таблица 1. Сравнительная оценка проведенных расчетов показателей надежности резервированных систем

| Примеры для расчета |                               |                                                                                                                               | Сравнительная оценка проведенных расчетов |                                         |                   |                                          |                      |                              |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
|                     |                               |                                                                                                                               | Показатели                                | Метод расчета                           |                   |                                          |                      | Относительная погрешность, % |
|                     |                               |                                                                                                                               |                                           | Теоретический                           |                   | Моделирование                            |                      |                              |
| № п/п               | Описание системы              | Характеристики системы                                                                                                        |                                           | Результаты                              | Формулы           | Результаты                               | Число испытаний, шаг |                              |
| 1                   | 2                             | 3                                                                                                                             | 4                                         | 5                                       | 6                 | 7                                        | 8                    | 9                            |
| 1                   | Рис. 1                        | $m = 3$<br>$\lambda_1 = 40 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_3 = 0,4 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 8760$ ч | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c$     | 0,6777<br>22522<br>$44,4 \cdot 10^{-6}$ | (1)<br>(2)<br>(3) | 0,6782<br>22532<br>$44,22 \cdot 10^{-6}$ | 200000<br>100        | 0,073<br>0,044<br>0,405      |
| 2                   | Рис. 2<br>Структура (1, 2, 0) | $\lambda_0 = 1000 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 1000$ ч                                                                              | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c(t)$  | 0,7474<br>1833<br>$590 \cdot 10^{-6}$   | (4)<br>(5)<br>(6) | 0,7473<br>1834<br>$587,85 \cdot 10^{-6}$ | 200000<br>50         | 0,013<br>0,054<br>0,364      |
| 3                   | Рис. 2<br>Структура (1, 0, 2) | $\lambda_0 = 1000 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_p = 100 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 1000$ ч                                           | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c(t)$  | 0,9012<br>2742<br>$244 \cdot 10^{-6}$   | (4)<br>(5)<br>(6) | 0,9021<br>2745<br>$243,65 \cdot 10^{-6}$ | 200000<br>100        | 0,100<br>0,109<br>0,143      |
| 4                   | Рис. 3                        | $\lambda_{01} = 10 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{02} = 40 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{03} = 100 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 8760$ ч  | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c(t)$  | 0,5885                                  | (4)               | 0,5879<br>12418<br>$88,96 \cdot 10^{-6}$ | 200000<br>100        | 0,102                        |
| 5                   | Рис. 4                        | $\lambda_{01} = 10 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{02} = 100 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{03} = 20 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 1000$ ч  | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c(t)$  | 0,9909                                  | (8) [1]           | 0,9892<br>14535<br>$21,59 \cdot 10^{-6}$ | 200000<br>100        | 0,171                        |

Продолжение таблицы 1

| Примеры для расчета |                  |                                                                                                                                                                  | Сравнительная оценка проведенных расчетов |               |         |                                           |                      |                              |
|---------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|---------|-------------------------------------------|----------------------|------------------------------|
|                     |                  |                                                                                                                                                                  | Показатели                                | Метод расчета |         |                                           |                      | Относительная погрешность, % |
|                     |                  |                                                                                                                                                                  |                                           | Теоретический |         | Моделирование                             |                      |                              |
| № п/п               | Описание системы | Характеристики системы                                                                                                                                           |                                           | Результаты    | Формулы | Результаты                                | Число испытаний, шаг |                              |
| 1                   | 2                | 3                                                                                                                                                                | 4                                         | 5             | 6       | 7                                         | 8                    | 9                            |
| 6                   | Рис. 5           | $\lambda_{0y} = 10 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{01} = 4 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{02} = 1 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{03} = 0,1 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 87600$ ч | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c(t)$  | 0,6176        | (3) [4] | 0,6184<br>123332<br>$10,30 \cdot 10^{-6}$ | 200000<br>100        | 0,130                        |
| 7                   | Рис. 6           | $\lambda_{01} = 10 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{02} = 40 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{p5} = 1 \cdot 10^{-6}$<br>$\lambda_{p6} = 4 \cdot 10^{-6}$<br>$t = 8760$ ч   | $R_c(t)$<br>$T_{0(c)}$<br>$\lambda_c(t)$  |               |         | 0,9699<br>34217<br>$9,26 \cdot 10^{-6}$   | 200000<br>200        |                              |

Как показывает анализ результатов расчетов, приведенных в таблице 1, относительная погрешность результатов не превышает 1%.

Кроме того программа «Диалог» позволяет рассчитывать показатели надежности резервированных систем в случае отсутствия аналитических формул.

Таким образом, разработанная программа моделирования «Диалог» может использоваться для расчета показателей надежности резервированных РЭС.

### Библиографический список

- ГОСТ 51901-14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М. Стандартинформ, 2008 г.
- Половко А.М. Основы теории надежности. М. Наука, 1964 г.
- Зайко Ю.Г., Смирнов М.Б. Оценка надежности системы со смешанным резервированием. «Надежность», №4 (11), 2004 г., с. 40-45.
- Зайко Ю.Г., Искандарова Л.Н. Расчет показателя безотказности резервированных систем с управляющими модулями. «Радиопромышленность», 2013 г.,

вып. 4, с. 50-60.

5. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки моделирования и базы данных. Под редакцией М. Брейера. Глава 1 М. Макдугал Моделирование на уровне системы. М. Мир, 1979 г.

### Сведения об авторах

**Юрий Г. Зайко**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, начальник сектора в ОАО «НИИ «Аргон».

Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 125, служ. тел. 8 (495) 319-68-89, тел. 8-917-576-43-00.

**Ларелла Н. Искандарова**, ведущий инженер-программист в ОАО «НИИ «Аргон».

Россия, Москва, Варшавское шоссе, д. 125, служ. тел. 8 (495) 319-68-89, тел. 8-926-624-64-27.

**Александр В. Трахтомиров**, директор научно-производственного предприятия «Оберон».

Украина, Харьков, ул. Гаршина, 4, тел. +380 57 7004476, +380 68 6088611.

Поступила 07.10.2015