Жаднов В.В., Тихменев А.Н.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Предприятия отечественной радиопромышленности, занимающиеся разработкой и производством электронных средств (ЭС) для космических аппаратов (КА), сталкиваются с проблемами обеспечения надежности, и, в первую очередь, безотказности. Об этом свидетельствуют как отказы при проведении приемо-сдаточных испытаний ЭС, так и аварии при эксплуатации КА. Одной из причин такой ситуации является применение устаревших и неточных методов оценки надежности ЭС КА на этапе проектирования, где закладывается та надежность, которая будет реализована при изготовлении и поддерживаться при эксплуатации.

С другой стороны, использование «нижних» оценок показателей безотказности может привести к снижению конкурентоспособности ЭС КА, так как в этом случае для повышения надежности необоснованно используют различные дополнительные способы, что ведет к ухудшению экономических, массогабаритных и других показателей. Поэтому повышение точности расчетной оценки надежности ЭС КА с длительными сроками активного существования, особенно для ЭС, в которых для обеспечения надежности используются и резервирование, и реконфигурация, является актуальной задачей.

Ключевые слова: *надежность, электронные средства, отказоустойчивость, имитационное моделирование.*

Резервирование – одно из основных средств обеспечения заданного уровня надежности ЭС при недостаточно надежных его составных частях (СЧ). Цель резервирования – обеспечить безотказность ЭС в целом, т.е. сохранить его работоспособность, когда возник отказ одной или нескольких СЧ. Наряду с «традиционным» резервированием путем введения дополнительных (резервных) СЧ применяют и другие виды резервирования. Среди них временное резервирование (с использованием резервов времени), информационное резервирование (с использованием резервов информации), функциональное резервирование, при котором используется способность СЧ выполнять дополнительные функции или способность ЭС перераспределять функции между СЧ, нагрузочное резервирование, при котором используется способность воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных, а также способность ЭС перераспределять нагрузки между СЧ [1].

Одним из способов практической реализации резервирования, основанного на способности ЭС перераспределять функции (или нагрузки) между СЧ, является реконфигурация его структуры при отказах. При использовании такого резервирования возникает проблема оценки эффективности

алгоритмов реконфигурации, то есть необходимо оценить, на сколько в количественном исчислении возросли показатели надежности ЭС.

В случае наличия реконфигураций структуры в ходе функционирования ЭС для оценки надежности необходимо учитывать не только возможные комбинации работающих и не работающих СЧ на конец периода функционирования, но и последовательность их отказов. Это обусловлено тем, что при отказе одних СЧ могут изменяться режимы работы других, а, следовательно, и их характеристики надежности [2].

Для таких случаев общепринятые методы аналитических расчетов (методы минимальных путей/сечений и др.) малопригодны. Для оценки показателей надежности аналитическим методом может быть построена математическая модель, учитывающая структурную избыточность и возможные сценарии отказов и реконфигураций ЭС с вероятностями каждого из них. Такая модель строится на основе теоремы полной вероятности и для максимальной адекватности должна учитывать все возможные сценарии функционирования, при которых сохраняется работоспособность ЭС. В противном случае результаты расчета будет заведомо приближенными.

Однако на практике при большом количестве взаимосвязанных компонентов и разнообразных алгоритмах реконфигураций выполнить данное требование при построении математической модели крайне сложно из-за непомерно большого количества вариантов, поэтому обычно вводят ряд допущений, позволяющих получить «нижнюю» оценку надежности.

Альтернативой аналитическому методу является метод имитационного моделирования. Однако построение модели, ее верификация и проведение имитационного эксперимента являются сложными и достаточно длительными операциями, требующими высокой квалификации исследователя. Применение имитационного моделирования позволяет получить оценку показателей надежности сложных ЭС с высокой точностью за счет адекватного описания его структуры и алгоритмов реконфигурации. Основная сложность применения этого метода заключается не столько в построении формальной модели, сколько в ее верификации для подтверждения правильности полученных результатов.

Несмотря на универсальность этого метода исследования, его применение для расчета надежности не носит системного характера, немногочисленные статьи по данной тематике разрозненны и описывают построение моделей для конкретных структур ЭС [3, 4]. Это приводит к необходимости многократного повторения разработки достаточно схожих между собой моделей надежности ЭС средствами различных языков программирования. Существующие разработки в области имитационного моделирования надежности сложных систем относятся к вопросам технического обслуживания [5]. Для решения этих задач созданы и специализированные программные продукты (например, система AvSim+ компании Isograph) с наборами заготовок и универсальные языки моделирования (например, широко известный язык GPSS позволяет описывать достаточно сложные по структуре системы ЗИП [6]), позволяющие провести моделирование системы технического обслуживания и оценить ее эффективность. Однако применение даже гибких, на первый взгляд, языков имитационного моделирования не позволяет существенно упростить задачу построения и верификации модели ЭС со сложным алгоритмом реконфигурации.

Для решения подобных задач была разработана система АСОНИКА-К-РЭС, позволяющая создавать модели реконфигурируемых ЭС из «стандартных» элементов, по аналогии с тем, как создаются модели систем массового обслуживания в языке GPSS. Система (см. рис. 1) включает в себя компилятор языка, инструменты верификации модели, средства проведения имитационных экспериментов и обработки их результатов.

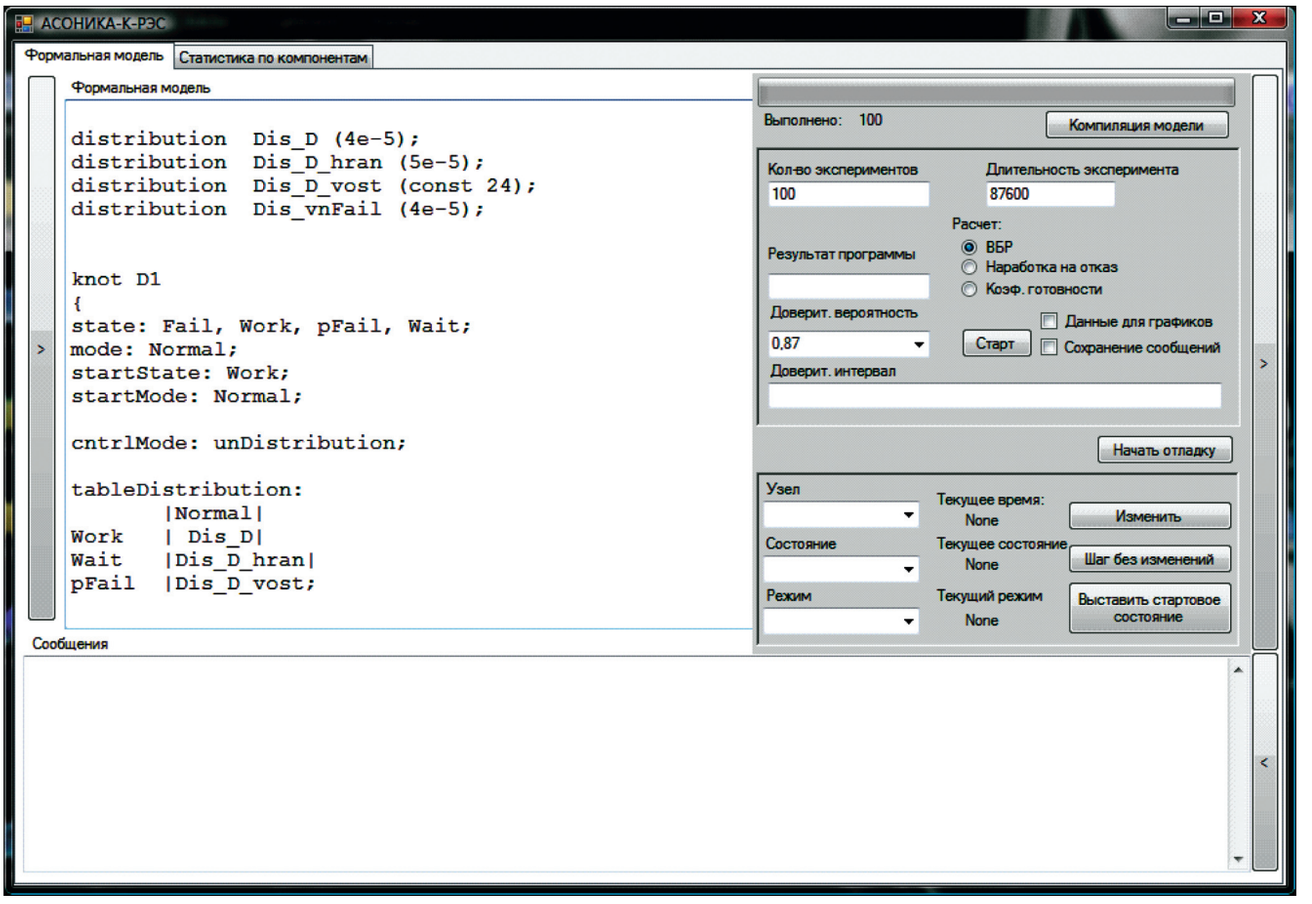

Рис. 1. Система АСОНИКА-К-РЭС. Интерфейс пользователя

Для описания моделей был разработан специализированный язык описания отказов реконфигурируемых электронных средств (входной язык системы АСОНИКА-К-РЭС). Язык позволяет описать отдельно каждый компонент ЭС через его список состояний и режимов, а также интенсивности переходов между состояниями. В соответствии с семантикой языка модель каждого компонента в некоторой степени «живет своей жизнью», то есть после начала имитационного эксперимента для каждого компонента определяется время, которое он проведет в стартовом состоянии и далее его состояния начинают изменяться в соответствии с его описанием [7].

В качестве примера рассмотрим задачу расчета блока телеметрии (БТ), который входит в состав бортового интегрированного вычислительного комплекса, (БИВК) предназначенного для использования в околоземном космическом пространстве в составе бортовых вычислительных сетей космического аппарата. Для обеспечения требований по надежности, исходя из структурных особенностей БТ, была разработана схема резервирования и алгоритм реконфигурации.

БТ является сложным изделием, содержащим большое число СЧ, объединенных в резервированные группы на нескольких уровнях разукрупнения. БТ состоит из 2-х комплектов модулей. Однотипные модули расположены на одной ячейке, но питаются от различных источников электроэнергии. БТ имеет локальный контур резервирования для поддержания автономного функционирования независимо от работоспособности остальной части БИВК. Этот контур имеет 4 ступени резервирования и представлен на рис. 2.

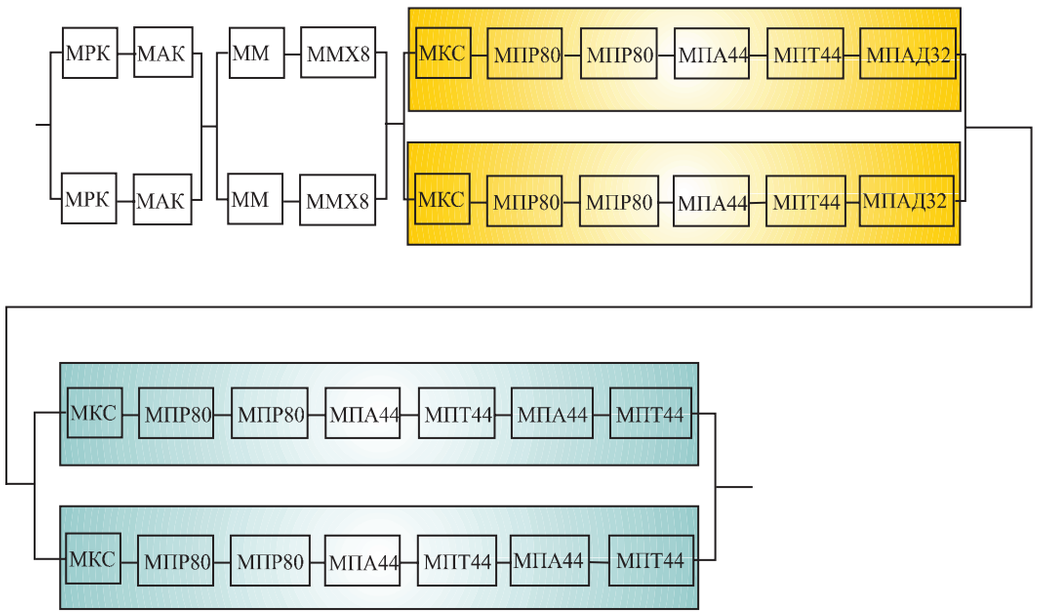

Рис. 2. Локальный контур резервирования БТ

Следует отметить, что для цепочек компонентов внутри прямоугольников (см. рис. 2) отказ любого компонента в каждом из них (кроме МКС) или даже нескольких компонентов не приводит к полному отказу всей цепочки, поскольку, если такие же компоненты остаются работоспособными в аналогичной цепочке, то эти отказы могут парироваться аппаратно-программными средствами самого БТ без участия внешнего управления (при условии, что питание подано на обе цепочки) и, таким образом, БТ остается полностью работоспособным.

Модули телеметрии полукомплектов А и Б (см. рис. 2) функционируют следующим образом:

- модуль МПС(А) обеспечивает питание следующих групп модулей:
  - модуль ММ(А) + модуль ММХ8(А);
  - 2 группы модулей МКПС(А);
  - 11 групп модулей МУП2(А), причем каждый модуль МУП2(А) связан по цепям питания с одним из измерительных модулей МПТ32(А), МПА64(А), МПЦ80(А), МПН32(А).
- каждый из двух модулей МКПС(А) связан функционально с группой измерительных модулей: модуль МКПС1(А) связан с тремя модулями МПТ32(А) (группа 1 измерительных модулей на рис. 3), двумя модулями МПЦ80(А) (группа 3 измерительных модулей на рис. 3) и одним модулем МПН32(А) (группа 4 измерительных модулей на рис. 3);
- модуль МКПС2(А) связан с двумя модулями МПТ32(А) (группа 1 измерительных модулей на рис. 3), одним модулем МПА64(А) (группа 2 измерительных модулей на рис. 3) и двумя модулями МПЦ80(А) (группа 3 измерительных модулей на рис. 3).
- аналогично модуль МПС(Б) обеспечивает питанием такие же модули полукомплекта Б.
- при отказе модуля МПС(А) отключаются все модули полукомплекта А, перечисленные выше, и в работу включается модуль МПС(Б) и все модули полукомплекта Б.
- при отказе модулей ММ(А) или ММХ8(А) в работу включаются модуль МПС(Б) и все модули полукомплекта Б, модули ММ(Б) и ММХ8(Б) начинают функционировать вместо отключенных модулей ММ(А) и ММХ8(А).
- при отказе одного из модулей МКПС(А) в работу включаются модуль МКПС(Б) и все модули полукомплекта Б, кроме измерительных модулей и модулей МУП2, связанных с модулем МКПС(Б),

соответствующим исправному модулю МКПС(А). Вместо отказавшего модуля МКПС(А) и связанной с ним цепочки измерительных модулей с соответствующими им модулями МУП2(А) начинает функционировать модуль МКПС(Б) и связанная с ним цепочка измерительных модулей и модулей МУП2(Б).

- при отказе одного из модулей МУП2(А) или одного из измерительных модулей полукомплекта А в работу включаются следующие модули: МПС(Б), ММ(Б), ММХ8(Б), МКПС1(Б), МКПС2(Б), измерительный модуль полукомплекта Б вместе со своим модулем МУП2, соответствующие отказавшему модулю полукомплекта А. Все остальные измерительные модули и соответствующие им модули МУП2 полукомплекта Б остаются в выключенном состоянии. Вместо отказавшего модуля МУП2(А) или измерительного модуля полукомплекта А начинают функционировать соответствующий измерительный модуль полукомплекта Б и связанный с ним по питанию модуль МУП2(Б).

Структурная схема надежности БТ, соответствующая этим условиям функционирования, приведена на рис. 3.

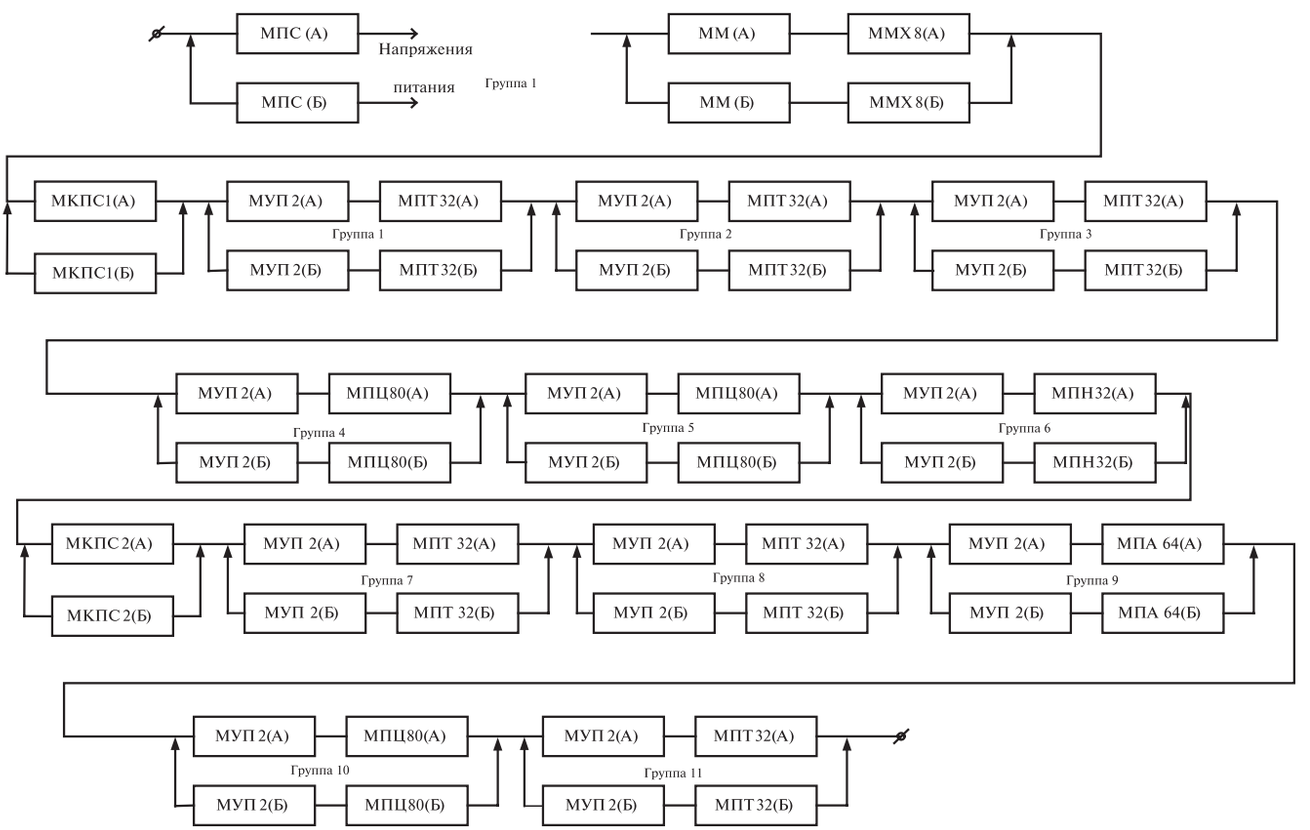

Рис. 3. Структурная схема надежности БТ

Описание модулей БТ на входном языке системы АСОНИКА-К-РЭС является достаточно простым, т.к. все они являются невосстанавливаемыми и просто работают до отказа, и лишь для модулей полукомплекта Б есть два режима: ожидания (хранения) и работы. Такой процесс можно представить в виде диаграммы, приведенной на рис. 4.

Для «элементарных» компонентов моделируется переход из состояния в состояние через законы распределения. Переход в другое состояние с тем же режимом характеризуется некоторой плотностью вероятности во времени. Плотность в формальной модели задается через закон распределения времени нахождения компонента в каждом состоянии.

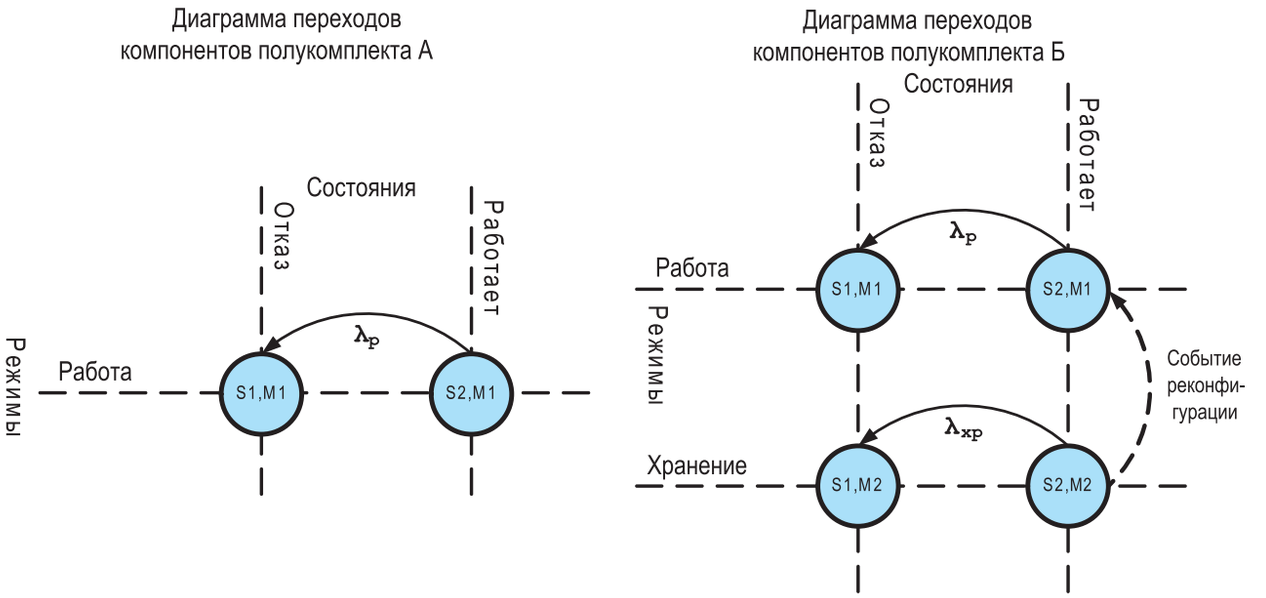

Рис. 4. Диаграммы переходов модулей БТ

Переход из состояния в состояние также может произойти в результате какого-либо события в модели. Причем переход по интенсивности не может изменить режима, изменяется только состояние. Событие же может перевести компонент в любую пару «режим-состояние». Семантика стандартной модели компонента предполагает, что первое состояние – это состояние отказа, из него переход в другое состояние невозможен.

Формальная модель компонента выглядит несколько более громоздко, но, несмотря на это, достаточно проста и логична:

```
knot MMX8_B
{
state: Fail, Work;
mode: Normal,Wait;
startState: Work;
startMode: Wait;
cntrlMode: unDistribution;
tableDistribution:
 |Normal |     Wait |
Work | Dis_MMX8|Dis_MMX8_Wait;
tableStateChange:
 Normal |Wait
Work          |Fail     |Fail ;
};
```

Приведенное описание является универсальным и состоит из следующих блоков:

- state <список возможных состояний компонента>;
- mode <список возможных режимов компонента>;
- startState <стартовое состояние>;
- startMode <стартовый режим>;
- cntrlMode <параметр, определяющий тип компонента (элементарный или составной)>;
- tableDistribution <таблица распределений времени нахождения в каждой паре (режим; состояние)>;
- tableStateChange <таблица направлений переходов из каждой пары (режим; состояние)>.

Таким образом, «текстовая» модель однозначно описывает вид диаграммы переходов, представленной на рис. 4.

В данной модели используется экспоненциальное распределение, поэтому нет необходимости в учете предыдущих состояний компонента, однако в общем случае предусмотрена возможность учета пути для других типов распределения. Такие модели описаны в [7].

Объединение компонентов в единую модель проводится путем использования компонентов более высокого уровня разукрупнения. Так, в качестве этого может использоваться либо условное обозначение группы компонентов, входящих в резерв, либо описание ЭС в целом. Группа компонентов определяется аналогично отдельному компоненту, но ее состояние определяется не распределением, а как функция от состояния других компонентов. При этом в условие отказа группы может быть включен как элементарный компонент, так и группа компонентов. Именно для этого внешне компонент, описывающий группу, характеризируется такими же параметрами, как и элементарный – состояние и режим работы [8].

При построении модели БТ достаточно удобно объединить в группы компоненты из полукомплекта А и Б, которые резервируют друг друга. Для описания критериев отказа используются логико-математические операции над состояниями компонентов. В общем случае это может быть вычислительная процедура со своими локальными и глобальными переменными, циклами и ветвлениями. В случае же модели БТ достаточно использовать небольшие выражения над состояниями компонентов. Результат такого выражения должен быть равен «1», если группа работоспособна, и «0» в случае ее отказа. Для любой из резервированных групп написать такое выражение не составляет труда. Пример такого выражения приведен ниже:

```
function FunctGroup2
{
return (MPS_A&MUP2_2_A &MPT32_2_A)|( MPS_B&MUP2_2_B&MPT32_2_B);
};
```

При вычислении состояния имена компонентов заменяются «1», если компонент не в состоянии отказа (первом указанном в списке состояний), и «0» в противоположном случае. Также можно использовать следующую запись: K1_1:Work. Этот оператор возвращает «1», если компонент находится в состоянии «Work» и «0» для любого другого состояния. Таким образом, данное выражение остается равным «1» до тех пор, пока остаются работоспособными компоненты хотя бы в одном полукомплекте.

Для описания подключения резервных компонентов и отключения основных используется специализированная конструкция switch_event. Эта конструкция представляет собой пару «условие реконфигурации – действие реконфигурации». Для описания действия реконфигурации используются операторы смены состояния и смены режима. В условии реконфигурации также используются логико-математические операции над состояниями компонентов в модели, однако для упрощения задачи были добавлены операторы определения момента перехода компонента из состояния в состояние. Для описания реконфигураций внутри БТ необходимо создать достаточно много действий реконфигурации, но они являются дополнением друг друга. Каждое из действий описывает реконфигурацию при отказе одного компонента, поэтому включает в себя всего несколько действий. Пример одной из таких конструкций приведен ниже:

```
switch_Event MUP_1_A_FAIL (->MUP2_1_A:Fail|->MPT32_1_A:Fail)
{
set_mode (MPS_B:Normal);
```

```
set_mode(MM_B:Normal);
set_mode(MMX8_B:Normal);
set_mode(MKPS1_B:Normal);
set_mode(MKPS2_B:Normal);
set_mode(MUP2_1_B:Normal);
set_mode(MPT32_1_B:Normal);
};
```

В данном примере условием начала реконфигурации является переход компонента МУП2 или компонента МПТ32 в состояние отказа. Действием является изменение режимов тех компонентов, которые должны включиться в работу в соответствии с описанием: это общие компоненты полукомплекта Б и резервная группа для отказавших компонентов. Составить остальные действия реконфигурации по аналогии с этим не представляет особого труда, так как они полностью повторяют описание структуры БТ.

После программирования описания формальной модели необходима ее верификация, так как, не подтвердив адекватность запрограммированных алгоритмов реконфигурации и критериев отказов, нельзя быть уверенным, что результаты моделирования будут достоверными.

На начальном этапе для верификации использовались результаты расчета вероятности безотказной работы ($P_{БТ}$), полученные по следующей математической модели:

$$P_{БТ}(t) = e^{-\lambda_{A(Э)}t} + \sum_{i=1}^{10} \lambda_{Mi(Э)} \int_0^t e^{-\lambda_{Б(x)}\tau} \cdot e^{-\lambda_{A(Э)}\tau} \cdot P_{рез(i)}(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

где $\lambda_{A(Э)}$ – интенсивность отказов всех модулей полукомплекта А, находящихся во включенном состоянии; i – номер сценария реконфигурации, соответствующего отказу в момент времени τ i-го модуля из полукомплекта А; $\lambda_{Mi(Э)}$ – интенсивность отказов i-го модуля полукомплекта А во включенном состоянии; $\lambda_{Б(x)}$ – интенсивность отказов всех модулей полукомплекта А, находящихся в выключенном состоянии; $P_{рез(i)}$ – ВБР резервированной системы модулей телеметрии за время t, после отказа в момент времени τ i-го модуля полукомплекта А, при условии что до момента τ все модули полукомплекта Б были исправны.

Модель (1) имеет ряд ограничений, в частности при ее выводе было принято, что полукомплект Б должен быть полностью исправен для замены любого отказавшего модуля полукомплекта А, однако в реальности требуется функционирование только тех узлов, которые непосредственно включаются в работу в соответствии со сценарием реконфигурации и лишь один из сценариев требует полнофункционального комплекта Б – отказ МПС(А), в то время как остальные допускают возможность отказа части компонентов полукомплекта Б. Кроме того, (1) учитывает реконфигурацию БТ только при первом отказе, а любой последующий отказ считается отказом всей БТ, что также не соответствует реальному алгоритму функционирования.

Несмотря на эти ограничения, очевидно, что значение $P_{БТ}$, полученное в результате имитационного моделирования, не может быть ниже рассчитанного по модели (1). Кроме того, для верификации модели в системе АСОНИКА-К-РЭС предусмотрена и возможность проведения управляемого эксперимента. В этом случае пользователь сам определяет последовательность отказов компонентов и контролирует состояние модели после каждого отказа (рис. 5).

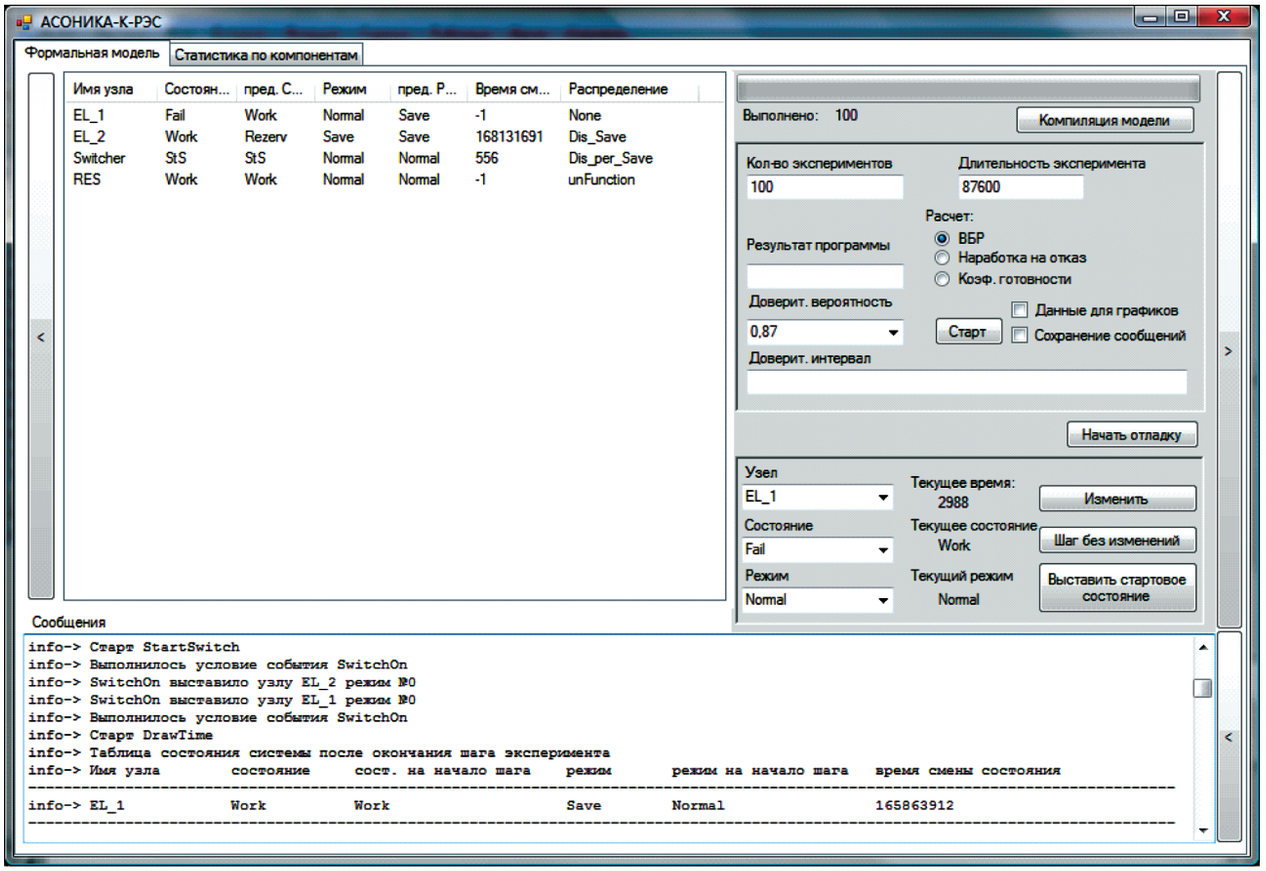

Рис. 5. Система АСОНИКА-К-РЭС. Процесс верификации модели

```
 |     Шаг отладки  №   7      |
  \_____________________________/
info-> Часы сдвинуты на 330 часов
info-> Часы системы выставленны на значение 2988 часов
info-> Изменяет сотояние узел Switcher
info-> Узлу Switcher присвоенно состояние StS
info-> Старт StartSwitch
info-> Выполнилось условие события SwitchOn
info-> SwitchOn выставило узлу EL_2 режим №0
info-> SwitchOn выставило узлу EL_1 режим №0
info-> Выполнилось условие события SwitchOn
info-> Старт DrawTime
info-> Таблица состояния системы после окончания шага эксперимента
info-> Имя узла        состояние     сост. на начало шага    режим       режим на начало шага   время смены состояния
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
info-> EL_1            Work          Work                    Save        Normal                 19813522
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
info-> EL_2            Rezerv        Rezerv                  Save        Normal                 81382895
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
info-> Switcher        StS           StW                     Normal      Normal                 3544
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
info-> RES             Work          Work                    Normal      Normal                 -1
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

  ____________________________
 /                            \
|      Шаг отладки      №8     |
 \____________________________/
info-> Узлу EL_1 присвоенно состояние Fail режим Work
info-> Старт StartSwitch
info-> Выполнилось условие события EL_1_fail
info-> EL_1_fail выставило узлу EL_2 состояние №1
info-> Старт DrawTime
info-> Таблица состояния системы после окончания шага эксперимента
info-> Имя узла        состояние     сост. на начало шага    режим       режим на начало шага   время смены состояния
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
info-> EL_1            Fail          Work                    Normal      Save                   -1
```

Рис. 6. Система АСОНИКА-К-РЭС. Лог-файл управляемого эксперимента

В случае несоответствия реакции модели описанию работы БТ поиск ошибки можно осуществить при помощи анализа лог-файла выполнения шага эксперимента, в котором содержится информация о том, какие условия каких событий реконфигурации были выполнены и какие именно действия с компонентами модели ими были проведены. Пример такого лог-файла приведен на рис. 6.

Так как события реконфигурации обычно имеют достаточно простые условия и выполняют не так много действий, то на основе этого лог-файла и распечатки состояния компонентов до и после изменения можно легко определить источник ошибок и внести коррективы в программу (модель). Отметим, что в общем случае всегда рекомендуется верифицировать модель с участием специалиста, хорошо знающего объект исследования и не занятого непосредственно в разработке модели, т.к. это существенно облегчает процесс верификации и способствует быстрому поиску и устранению ошибок.

Однако и верифицированная модель не может дать «точную» оценку вероятности безотказной работы (или средней наработки) даже при значительном количестве виртуальных экспериментов (испытаний модели), поэтому для вычисляемых показателей надежности в системе АСОНИКА-К-РЭС рассчитывается доверительный интервал для доверительной вероятности, задаваемой пользователем. Очевидно, что увеличение числа экспериментов ведет к повышению точности оценки показателей надежности исследуемого ЭС. Графики, характеризующие снижение относительной ширины доверительного интервала для $P_{БТ}$ при увеличении количества экспериментов, приведены на рис. 7.

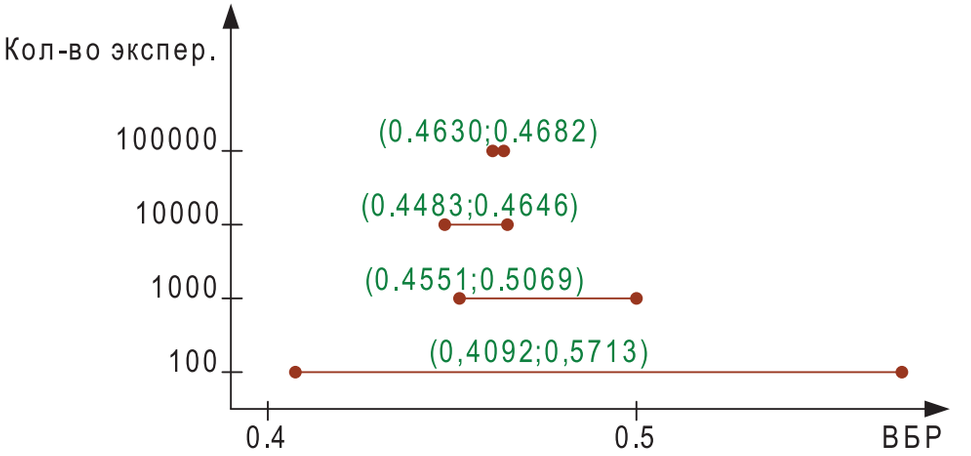

Рис. 7. Зависимость ширины доверительного интервала $P_{БТ}$ от количества экспериментов

Полученная в результате имитационного моделирования оценка $P_{БТ}$ оказалась на 17% выше результатов аналитического расчета по модели (1), что позволило подтвердить эффективность алгоритма реконфигурации БТ. Кроме того, по собранной в ходе экспериментов статистике времен отказов БТ были построены зависимости $P_{БТ}$ (рис. 8) и интенсивности отказов (рис. 9) от времени.

Такие графики представляют интерес при исследованиях надежности ЭС и поэтому включены в состав сервисных функций системы АСОНИКА-К-РЭС.

Еще одним полезным дополнением к методу имитационного моделирования, реализованному в системе АСОНИКА-К-РЭС, является возможность сбора статистик по причинам отказа. Это позволяет провести сравнительный анализ и выявить не только наименее надежные группы

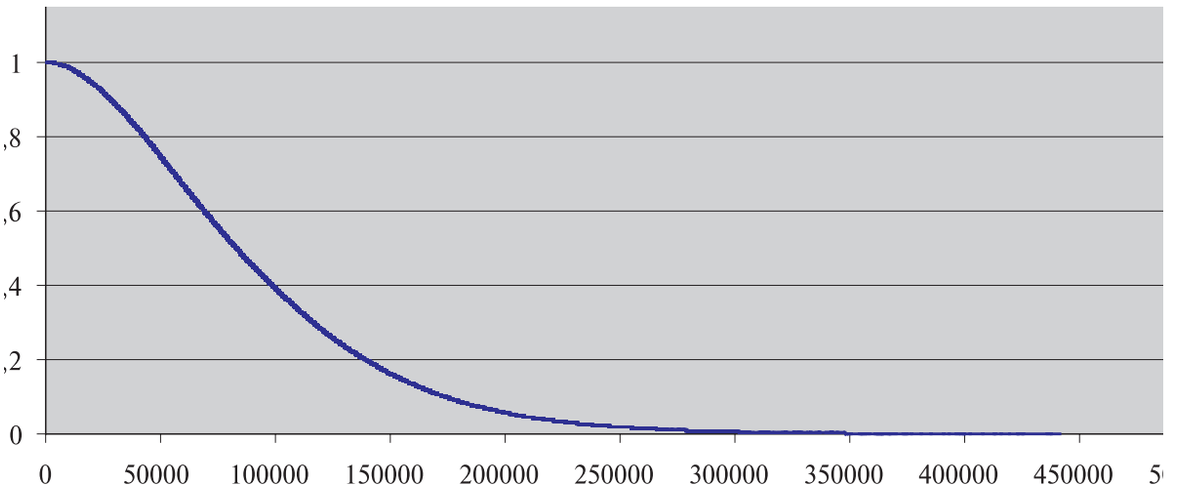

Рис. 8. Система АСОНИКА-К-РЭС. График зависимости $P_{БТ}$ от времени

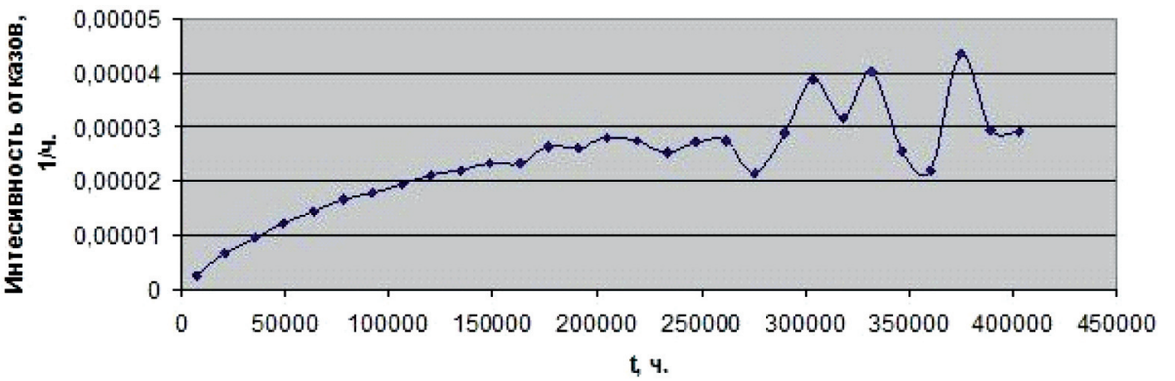

Рис. 9. Система АСОНИКА-К-РЭС. График зависимости интенсивности отказов от времени

компонентов, но и наоборот, определить составные части ЭС, обладающие избыточной надежностью. Проведение повторных расчетов после внесения изменений в модель дает возможность оценить эффект этих изменений, и, тем самым, оптимизировать ЭС по критерию надежности.

Таким образом, в заключении можно констатировать, что созданный язык описания процесса реконфигурации ЭС при отказах его компонентов и программное обеспечение для работы с ним являются эффективными и перспективными инструментами исследования надежности. Применение системы АСОНИКА-К-РЭС позволяет не только повысить точность расчетов за счет адекватного описания структуры и алгоритмов реконфигурации ЭС, но и провести исследования, направленные на оптимизацию их структуры с точки зрения обеспечения надежности, непосредственно инженерам-разработчикам, от которых не требуется глубоких знаний ни в области имитационного моделирования, ни в теории надежности.

Литература

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения.

2. **Жаднов В.В., Лазарев Д.В.** Модели характеристик надежности составных частей РЭА. / Надежность: Научно-технический журнал. № 4 (11), 2004. – с. 15-23.

3. **Федухин А.В.** Моделирование надежности восстанавливаемой резервированной системы со структурой типа «k из n». / Математичні машини і системи, 2008, № 4.

4. **Задорожный В.Н., Рафалович С.А.** Решение уравнений в переключательных функциях на GPSS WORLD. / Автоматизированные системы обработки информации и управления в УНИРС: Сб. докл. студенч. науч.-практ. конф. – Омск: ОмГТУ, 2007. – с. 31-34.

5. **John J. Black, Mejabi O.O.** Simulation of Complex Manufacturing Equipment Reliability Using Object Oriented Methods. / Reliability Engineering & System Safety, 2004.

6. **Тихменев А.Н.** Применение языка GPSS WORLD для моделирования отказов электронных средств со сложной структурой резервирования. / Надёжность и качество: Труды Международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: ПГУ, 2011 – 1 т. – с. 333-335.

7. **Тихменев А.Н.** Язык описания отказов электронных средств с реконфигурируемой структурой. / Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ: Тез. докладов. – М.: МИЭМ, 2010. – с. 137.

8. **Жаднов В.В., Тихменев А.Н.** Моделирование компонентов электронных средств с реконфигурируемой структурой. / Надёжность и качество: Труды Международного симпозиума: в 2-х т. // Под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: ПГУ, 2010 – 1 т. – с. 330-331.

9. **Жаднов В.В., Полесский С.Н., Тихменев А.Н.** Разработка моделей надежности для проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры. / Радиовысотометрия-2010: Сб. тр. Третьей Всероссийской научно-технической конференции. // Под ред. А.А. Иофина, Л.И. Пономарева. – Екатеринбург: Из-во «Форт Диалог-Исеть», 2010. – с. 200-201.