

Тихменев А.Н., Абрамешин А.Е., Жаднов В.В.

Имитационное моделирование в оценке надежности электронных систем с реконфигурируемой структурой для космических аппаратов

Предприятия отечественной радиопромышленности, занимающиеся разработкой и производством электронных систем (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 не точных методов оценки надежности ЭС КА на этапе проектирования, где закладывается та надежность, которая будет реализована при изготовлении и поддерживаться при эксплуатации.

Получение «нижних» оценок показателей безотказности приводят к снижению конкурентоспособности ЭС КА, так как реальная надежность (избыточная) достигается за счет применения дорогих комплектующих, введения избыточности (резервирования), что ведет к ухудшению экономических, массогабаритных и др. показателей. Поэтому повышение точности расчетной оценки надежности ЭС КА с длительными сроками активного существования, особенно для ЭС, в которых для обеспечения надежности используются «оригинальные» схемы резервирования и (или) алгоритмы реконфигурации является актуальной задачей.

Одним из эффективных способов повышения надежности ЭС КА является введение структурной избыточности, однако при этом возникает проблема оценки эффективности новой структуры, то есть необходимо оценить, на сколько в количественном исчислении изменились показатели безотказности. Одними из основных показателей, которые необходимо определить, являются вероятность безотказной работы (ВБР) и средняя наработка на отказ.

В случае наличия реконфигураций структуры в ходе функционирования ЭС КА для оценки ВБР необходимо учитывать не только возможные комбинации работающих и не работающих компонентов на конец периода функционирования, но и последовательность отказов. Это обусловлено тем, что при отказе одного компонента зачастую изменяются режимы работы других [1]. Для таких случаев общепринятые методы аналитических расчетов (методы наименьших путей/сечений и др.) неприменимы. 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 результат расчета будет заведомо занижен.

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 учитывают только несколько шагов реконфигурации, а далее рассчитывают «до первого отказа», то есть считают отказом ЭС отказ любого из его компонентов, что неизбежно приводит к заниженной оценке надежности.

Альтернативой аналитическому расчету является расчет методом 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.

Рассмотрим задачу расчета реконфигурируемого ЭС на примере бортового интегрированного вычислительного комплекса (БИВК), который предназначен для использования в околоземном кос-

мическом пространстве в составе бортовых вычислительных сетей КА. Вследствие этого в ТЗ на разработку установлены жесткие требования по надежности, для обеспечения которых, исходя из структурных особенностей БИВК, была разработана схема резервирования и алгоритм реконфигурации.

БИВК является сложным изделием, содержащим большое число модулей, объединенных в резервированные группы на нескольких уровнях разукрупнения. БИВК состоит из 2-х комплектов модулей. Однотипные модули расположены на одной ячейке, но питаются от различных источников электроэнергии.

Процедуру оценки надежности реконфигурируемого ЭС рассмотрим на примере модуля АСВТМИ, который является составной частью БИВК и имеет локальный контур резервирования для поддержания автономного функционирования, независимо от работоспособности остальной части БИВК. Этот контур имеет 4 ступени резервирования и представлен на рис. 1.

Следует отметить, что для цепочек модулей внутри прямоугольников (см. рис. 1) отказ любого модуля в каждом из них (кроме модуля МКС), или даже нескольких модулей, не приводит к полному отказу всей цепочки, поскольку, если такие же модули остаются работоспособными в аналогичной цепочке, то эти отказы могут парироваться аппаратно-программными средствами самой АСВТМИ без участия внешнего управления (при условии, что питание подано на обе цепочки) и, таким образом, АСВТМИ остается полностью работоспособной.

Модули телеметрии полукомплектов А и Б (см. рис. 1) 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), двумя модулями МПЦ80(А) (группа 3 измерительных модулей) и одним модулем МПН32(А) (группа 4 измерительных модулей);

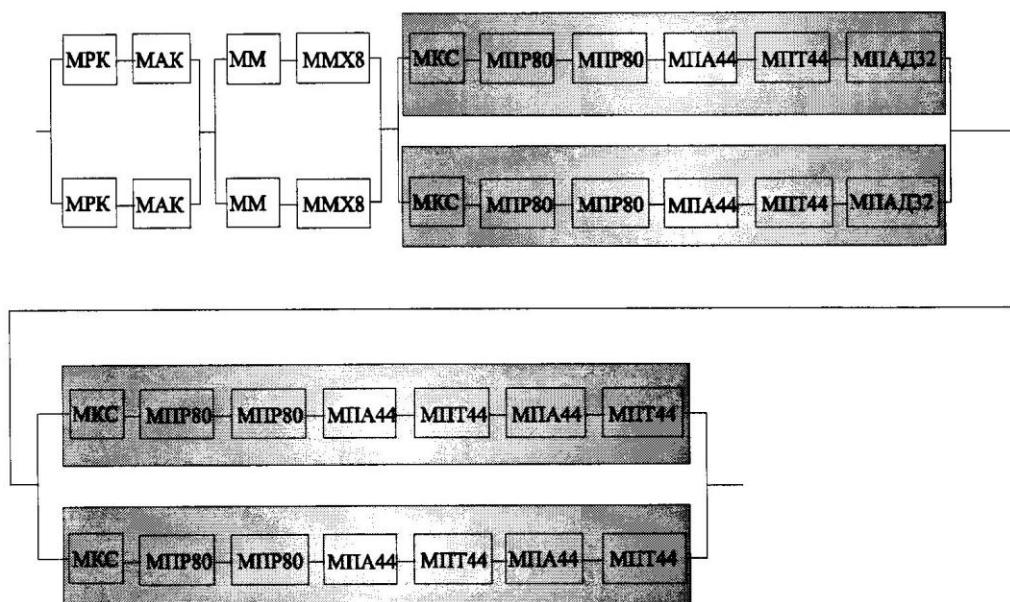


Рис. 1. Локальный контур резервирования модуля АСВТМИ

- модуль МКПС2(А) связан с двумя модулями МПТ32(А) (группа 1 измерительных модулей), одним модулем МПА64(А) (группа 2 измерительных модулей) и двумя модулями МПЦ80(А) (группа 3 измерительных модулей);
- 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), соответствующем 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 полу комплекта Б и связанный с ним по питанию модуль МУП2(Б).

Полная структурная схема надежности АСВТМИ, соответствующая этим условиям функционирования, приведена на рис. 2.

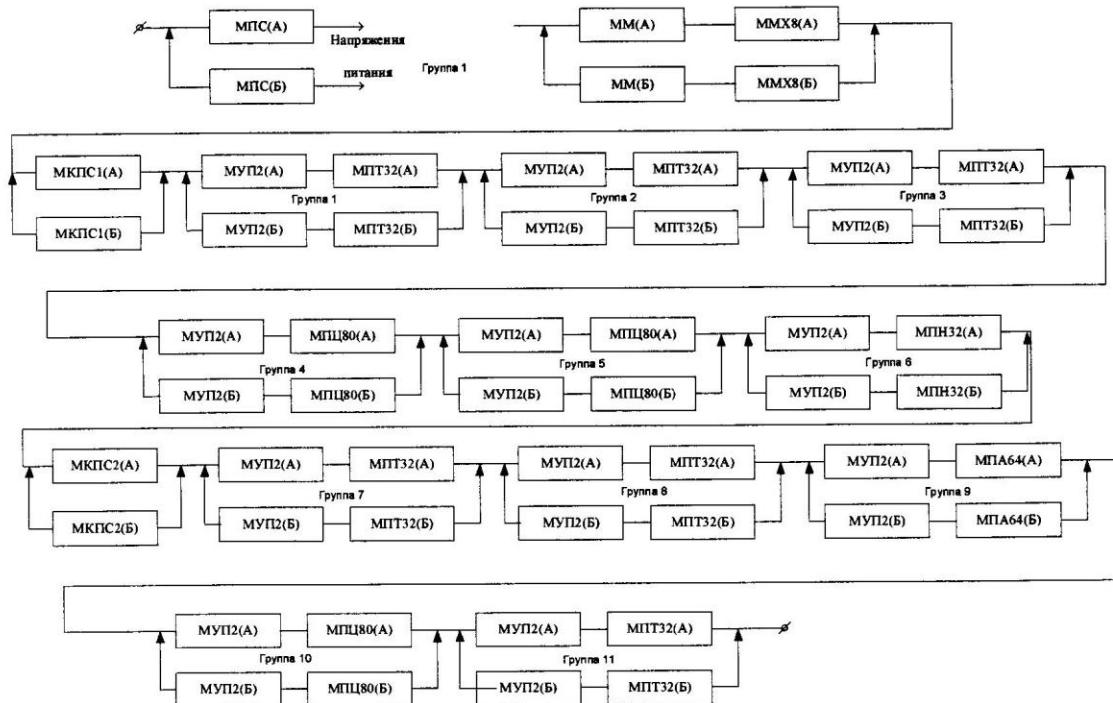


Рис. 2. Структурная схема надежности АСВТМИ

Аналитический расчет ВБР проводился по следующей математической модели:

$$\begin{aligned}
 P_{БИВК-T}(t) &= P_{A(\exists)}(t) + \sum_{i=1}^{10} P_i(t) = P_{A(\exists)}(t) + \sum_{i=1}^{10} \int_0^t P_{mod(i)}(\tau) \cdot a_{Mi}(\tau) \cdot P_{pes(i)}(t, \tau) d\tau = \\
 &= e^{-\lambda_{A(\exists)} t} + \sum_{i=1}^{10} \lambda_{Mi(\exists)} \int_0^t e^{-\lambda_{B(x)} \tau} \cdot e^{-\lambda_{A(\exists)} \tau} \cdot P_{pes(i)}(t - \tau) d\tau
 \end{aligned}, \quad (1)$$

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

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 АСВТМИ только при первом отказе, а любой последующий отказ считается отказом всей АСВТМИ, что также не соответствует реальному алгоритму функционирования.

Таким образом, при построении математической модели (1) были приняты допущения, позволяющие получить нижнюю оценку ВБР с неизвестной погрешностью относительно ее точного значения.

В этом случае для повышения точности оценки ВБР можно применить метод имитационного моделирования. Не смотря на универсальность этого метода исследования, его применение для расчета надежности не носит системного характера, немногочисленные статьи по данной тематике разрознены и описывают построение моделей для конкретных структур ЭС [2, 3]. 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 [4]. 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 может описывать достаточно сложные по структуре системы ЗИП [5]), 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 было разработано программное средство (система АСОНИКА-К-РЭС), позволяющее создавать модели реконфигурируемых ЭС из «стандартных» элементов, по аналогии с тем, как создаются модели систем массового обслуживания в языке GPSS.

Для создания таких моделей был разработан специализированный язык описания отказов реконфигурируемых электронных средств [6]. 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. Для компонентов БИВК такое описание является достаточно простым, т.к. все они являются невосстанавливаемыми и просто работают до отказа, и лишь для компонентов по-

лукомплекта Б есть два режима: хранения и работы. Такой процесс можно представить в виде диаграммы (см. рис. 3).

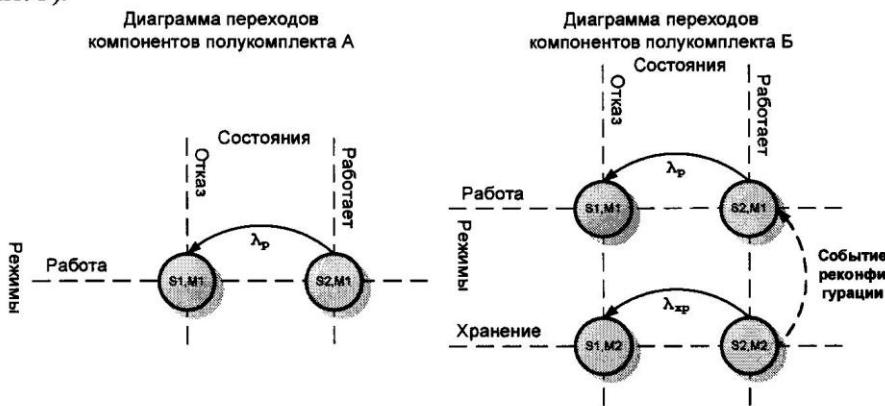


Рис. 3. Диаграммы переходов компонентов БИВК

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.

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, не смотря 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, представленный на рис. 3.

В данной модели используется экспоненциальное распределение, поэтому нет необходимости в учете предыдущих состояний компонента, однако в общем случае предусмотрена возможность учета путей 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, характеризуется такими же параметрами, как и элементарный - состояние и режим работы. Более подробно данный вопрос рассмотрен в [8].

При построении модели БИВК достаточно удобно объединить в группы компоненты из полу-комплекта 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 ветвлениеми. В случае же модели БИВК 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 полу komplekте.

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 так же 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 БИВК 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 в МПТ32 в состояние отказа. Действием является изменение режимов тех компонентов, которые должны включиться в работу в соответствии с описанием: это общие компоненты полу komplekta 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 БИВК.

Для интерпретации формальной модели в программную была разработана система АСОНИКА-К-РЭС (рис. 4), которая включает в себя компилятор языка, инструменты верификации модели, средства проведения имитационных экспериментов и обработки их результатов.

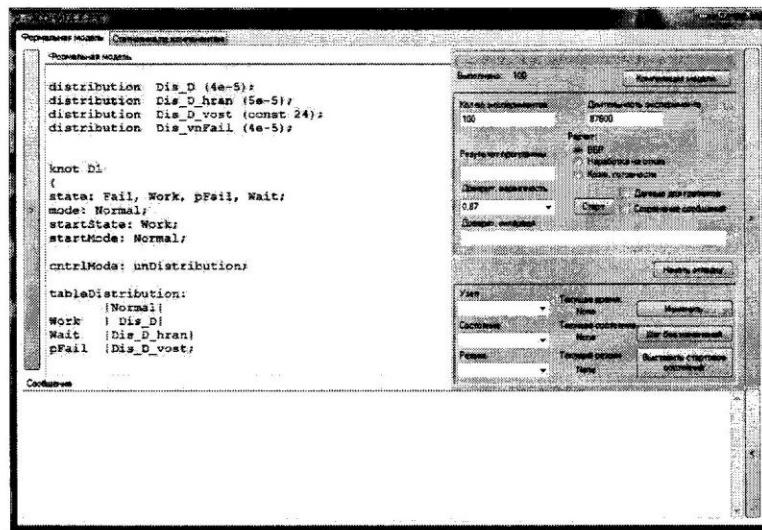


Рис. 4. Система АСОНИКА-К-РЭС: Интерфейс пользователя

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. Для верификации модели в системе АСОНИКА-К-РЭС предусмотрена возможность проведения управляемого эксперимента. В этом случае пользователь сам определяет последовательность отказов компонентов и контролирует состояние модели после каждого отказа (рис. 5).

В случае несоответствия реакции модели описанию работы ЭС 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 имели место. 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 достаточно легко определить источник ошибок и внести корректизы в программу (модель).

При построении модели АСВТМИ БИВК итоговая верификация модели происходила с участием специалистов-разработчиков. 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 наиболее быстрому устранению ошибок.

После завершения построения и верификации модели начинается непосредственно процесс расчетов. Система АСОНИКА-К-РЭС поддерживает два типа расчетов:

- расчет средней наработки на отказ;
- расчет вероятности безотказной работы.

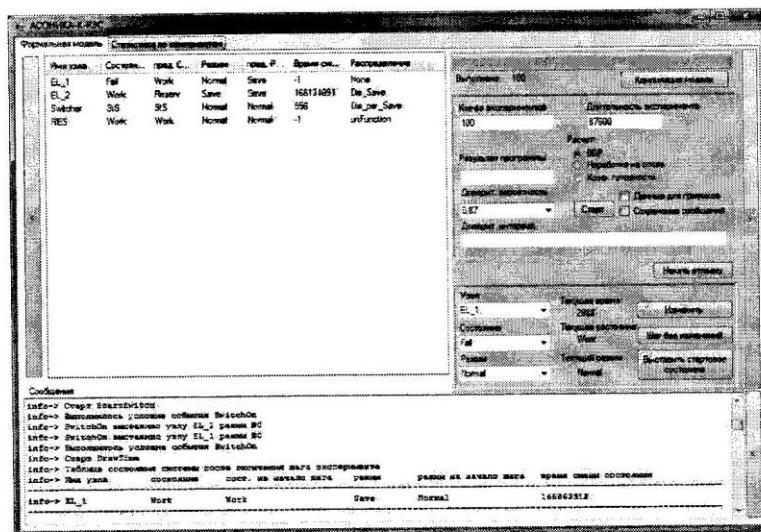


Рис. 5. Система АСОНИКА-К-РЭС: Процесс верификации модели

```

Шаг отладки № 7 |  

info-> Часы сдвинуты на 330 часов  

info-> Часы системы выставлены на значение 2988 часов  

info-> Изменяет состояние узел Switcher  

info-> Узлу Switcher присвоено 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    состояния    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 присвоено 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    состояния    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

При выборе первого варианта опционально по результатам экспериментов можно построить график ВБР и интенсивности отказов. Т.к. даже значительное количество виртуальных экспериментов не может дать точную оценку ВБР и/или наработки на отказ, то для вычисляемых величин расчитывается доверительный интервал для доверительной вероятности, заданной пользователем. Вследствие этого основным параметром, влияющим на точность результатов (при условии адекватности модели) является количество экспериментов над моделью. Это число в явном виде входит в формулы определения доверительного интервала для обеих величин:

$$I_{\beta} = (\tilde{m} - t_{\beta} \sigma_{\tilde{m}}; \tilde{m} + t_{\beta} \sigma_{\tilde{m}});$$

$$\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}},$$

где I_β – доверительный интервал наработки на отказ; t_β – табличный коэффициент, зависящий от доверительной вероятности; \tilde{m} – оценка математического ожидания случайной величины; \tilde{D} – оценка дисперсии; n – количество экспериментов.

$$p_1 = \tilde{p} - t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{p}(1-\tilde{p})}{n}},$$

$$p_2 = \tilde{p} + t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{p}(1-\tilde{p})}{n}},$$

где $(p_1; p_2)$ – доверительный интервал ВБР; \tilde{p} – оценка вероятности, полученная в ходе моделирования; t_β – табличный коэффициент, зависящий от доверительной вероятности; n – количество экспериментов.

Таким образом, повышение количества экспериментов ведет к повышению точности оценки показателей надежности исследуемого ЭС. Графики, характеризующие снижение относительной ширины доверительного интервала при увеличении количества экспериментов, приведены на рис. 7.

При расчете наработки на отказ по собранной в ходе экспериментов статистике времени отказа системы возможно построение зависимостей ВБР (рис. 8) и интенсивности отказов (рис. 9) от времени. Такие графики представляют интерес при исследованиях надежности и поэтому вынесены как дополнительная опция системы АСОНИКА-К-РЭС.

Более полезным дополнением к методу имитационного моделирования является возможность сбора статистик по причинам отказа. В системе АСОНИКА-К-РЭС реализована функция сбора статистики о состоянии ЭС на момент отказа. Это позволяет провести сравнительный анализ и выявить наименее надежные группы компонентов. Такая статистика позволяет определить не только слабые группы компонентов, но и наоборот, определить составные части ЭС, обладающие избыточной надежностью. В целом это позволяет оптимизировать ЭС по критерию надежности и, что немаловажно, после внесения изменений в структуру дает возможность оценить их эффект (что невозможно при применении аналитических методов, дающих нижнюю оценку показателей надежности с неизвестной погрешностью).

Полученная в результате имитационного моделирования оценка ВБР оказалась на 17 % выше результатов аналитического расчета («нижней» оценки) БИВК, что позволило подтвердить эффективность алгоритма реконфигурации и избежать троирования модулей АСВТМИ.

Таким образом, в заключении можно констатировать, что созданный язык описания процесса реконфигурации ЭС при отказах его элементов 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 КА, но и провести мероприятия по оптимизации его структуры с точки зрения обеспечения надежности непосредственно инженерами-разработчиками, от которых не требуется глубоких знаний ни в области имитационного моделирования, ни в теории надежности.

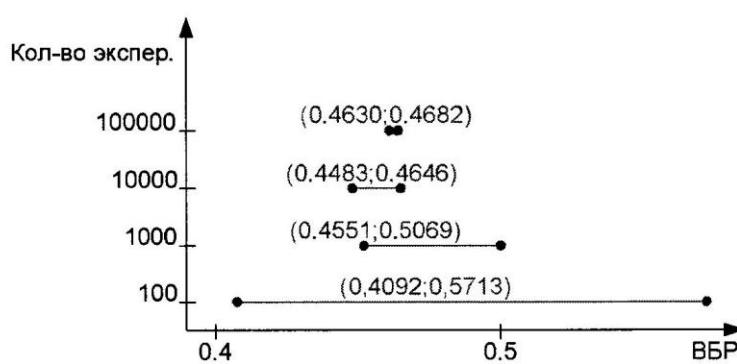


Рис. 7. Зависимость ширины доверительного интервала ВБР от количества экспериментов

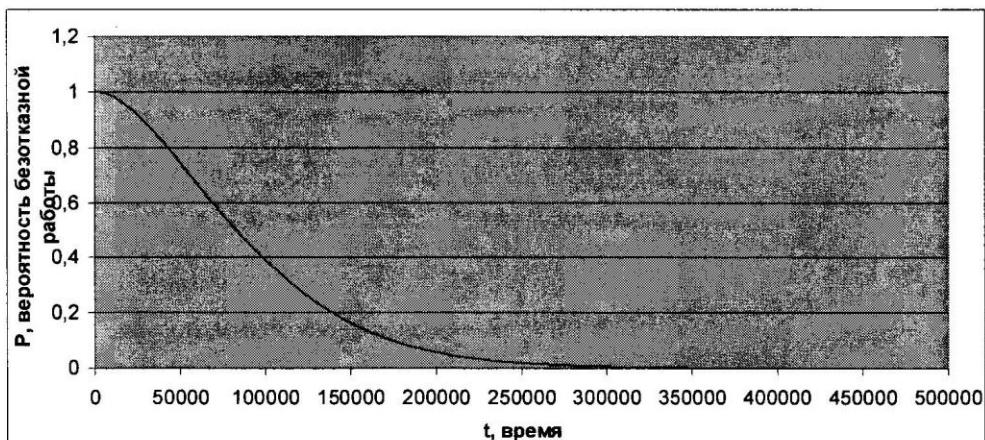


Рис. 8. Система АСОНИКА-К-РЭС: График зависимости ВБР АСВТМИ от времени

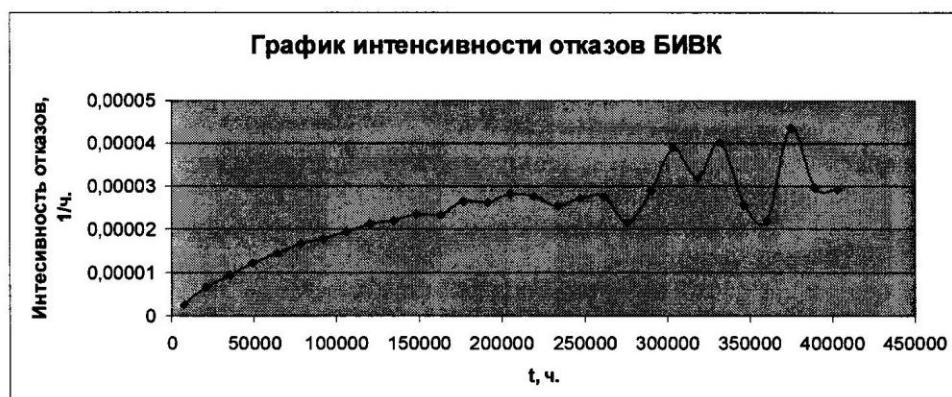


Рис. 9. Система АСОНИКА-К-РЭС: График интенсивности отказов АСВТМИ от времени

Список литературы

1. Абрамешин А.Е., Жаднов В.В., Жаднов И.В. Расчетная оценка надежности электронных модулей аппаратуры космических аппаратов. / Технологии ЭМС, № 1 (40), 2012. – С. 29–33.
2. Федухин А.В. Моделирование надежности восстанавливаемой резервированной системы со структурой типа « k из n ». / Математичні машини і системи, 2008, № 4.
3. 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.
4. John J Black, O.O. Mejabi. Simulation of Complex Manufacturing Equipment Reliability Using Object Oriented Methods. / Reliability Engineering & System Safety, 2004.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.