

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ СТРУКТУРНО ИЗБЫТОЧНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

В статье рассматриваются алгоритмы моделирования отказов структурно избыточных радиоэлектронных систем (РЭС). Для моделирования отказов используется метод имитационного статистического моделирования. В результате моделирования получают оценки показателей надежности структурно избыточной РЭС на заданном периоде ее эксплуатации. Приводится пример моделирования. Точность и адекватность модели с использованием разработанных алгоритмов проверена на простых структурах и при экспоненциальном распределении наработки до отказа элементов, при которых известны точные значения показателя средней наработки на отказ. Исследования показали, что точность модели в среднем не хуже 10%.

Ключевые слова: надежность, радиоэлектронные системы, модель отказов.

Постановка задачи. Одним из способов повышения надежности радиоэлектронных систем (РЭС) является введение структурного резервирования для части ее элементов. РЭС, как правило, имеет иерархическую конструктивную структуру, и резервирование ее элементов может вводиться на любом конструктивном уровне. Если, например, система конструктивно состоит из шкафов, блоков, ячеек и т.д., то и резервирование может вводиться соответственно на уровне шкафов, блоков, ячеек. Всегда интересно знать, как введение резерва на том или ином уровне повлияет на показатели надежности РЭС.

Рассматриваемые РЭС относятся к классу восстанавливаемых объектов, предназначенных для длительной эксплуатации, поэтому нас будут интересовать такие показатели надежности, как средняя наработка на отказ T_0 , и среднее время восстановления T_B [1].

Иерархическую конструктивную структуру РЭС представим в виде дерева, примерный вид которого показан на рис. 1. Отдельные конструктивные элементы будем обозначать e_{ij}^u , где u – номер конструктивного уровня (уровень вложенности) элемента, ij – составной индекс, идентифицирующий данный элемент. Индекс может быть двойным, тройным, и т.д. в зависимости от глубины вложенности элемента («длина» индекса равна u). Далее для простоты для произвольного конструктивного элемента мы будем использовать обозначение e_i^u , где i – номер элемента, точное значение которого в данный момент нас не интересует.

Номер конструктивного уровня u отсчитывается от корневой вершины e^0 , которая представляет систему в целом.

Элементы, в составе которых имеются другие элементы, условимся называть *составными*. Если состав элемента не детализируется (не определяются его внутренние элементы), то такой элемент будем называть *простым*. Простой элемент в действительности может представлять собой сколь угодно сложное техническое изделие, однако в данном конкретном случае нас не интересует его внутреннее устройство. Составные элементы на рис. 1 изображены прямоугольниками, простые – кружками. На нижнем уровне конструктивной структуры располагаются все простые элементы.

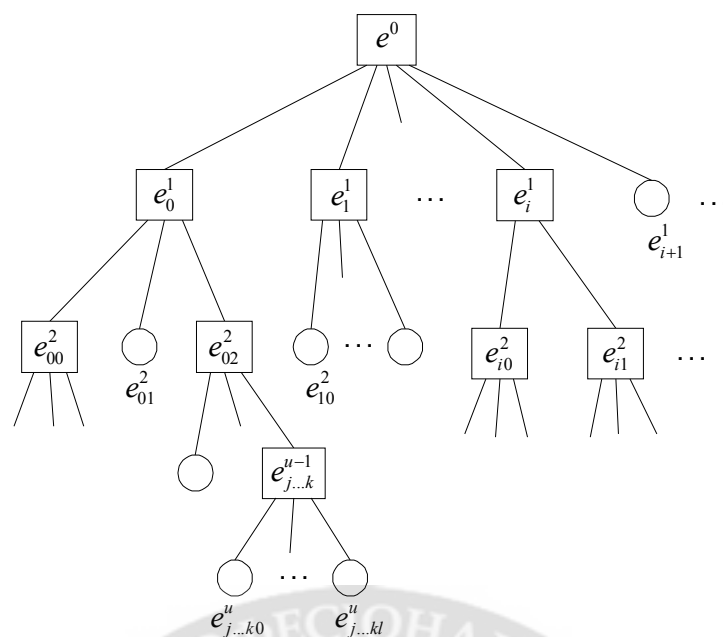


Рис. 1. Дерево конструктивной структуры РЭС

Каждый отдельно взятый конструктивный элемент может иметь последовательную или параллельную (резервированную) надежность структуру. В случае параллельной структуры элемента все входящие в него внутренние элементы являются однотипными (одинаковыми). Резервирование может быть постоянным (нагруженным) или замещающим (ненагруженным). Таким образом, РЭС в целом может иметь произвольную последовательно-параллельную надежность структуру.

В данной модели *отказывающимися* элементами являются все элементы нижнего уровня (все простые элементы), множество этих элементов будем обозначать E_0 . Если некоторый элемент $e_i^u \in E_0$ отказывает, то система в целом отказывает или не отказывает в зависимости от наличия исправных резервных элементов, лежащих на ветви дерева, связывающей отказавший элемент e_i^u с корнем дерева e^0 .

Восстановление работоспособности системы осуществляется путем замены отказавших элементов, причем заменяться могут как простые (отказавшие) элементы, так и элементы старшего конструктивного уровня, в состав которых они входят. Заменяются, как правило, элементы, требующие для этого наименьших затрат времени.

Будем рассматривать две стратегии восстановления:

а) **Восстановление после отказа системы.** Восстановление начинается только после отказа системы в целом. Восстанавливаются все отказавшие к этому моменту времени элементы, включая резервные.

б) **Постоянное восстановление.** Восстановление осуществляется непрерывно по мере отказов элементов. Если отказ произошел в резервированной группе, то система во время восстановления может оставаться работоспособной за счет оставшихся исправных резервных элементов.

Восстановление будем считать неограниченным (восстановление начинается сразу после возникновения отказа системы или элемента в зависимости от принятой стратегии восстановления). Задержками времени индикации отказов и времени переключения резерва будем пренебрегать.

В целом задача состоит в том, чтобы определить показатели надежности такой системы при произвольном законе распределения наработки до отказа элементов. Существует весьма большое количество моделей, позволяющих решать подобные задачи при различных структурах системы и стратегиях восстановления [2-4]. Однако большинство из них основано на предположении, что отказы системы подчинены экспоненциальному закону

распределения. При неэкспоненциальных законах распределения модели усложняются и в большинстве своем становятся малопригодными при решении практических задач. В реальных задачах, особенно в задачах определения ресурса систем или определения оптимальных параметров технического обслуживания, допущение об экспоненциальности распределения наработки до отказа элементов неприемлемо, так как противоречит физическому смыслу моделируемых процессов.

В данной статье для решения поставленной задачи предлагается использовать метод имитационного статистического моделирования. За основу берется разработанная ранее имитационная статистическая модель (ИСМ) [5], в которую введены новые алгоритмы, позволяющие моделировать отказы РЭС с учетом введения резервирования на любом уровне ее конструктивной структуры. При этом модель остается независимой от выбора закона распределения наработки до отказа элементов – этот выбор сводится к выбору датчика случайных чисел, используемого при моделировании отказов.

Далее приводится краткое описание основных алгоритмов моделирования отказов резервированных систем, затем приводится пример моделирования.

Алгоритмы моделирования отказов. Прежде чем рассматривать сами алгоритмы, необходимо кратко пояснить основные принципы построения модели [5], в которую эти алгоритмы встраиваются.

Перед запуском модели в оперативной памяти компьютера создается списковая структура данных, в которой представляется вся информация о конструктивной и надежностной структуре РЭС. Поскольку программы моделирования реализованы в системе программирования Delphi, для создания списков использовался тип `tList` [6]. Созданная в памяти списковая структура данных воспроизводит дерево конструктивной структуры системы (рис. 1). Вся необходимая для этого информация считывается из базы данных модели. Элементами списков являются указатели на объекты (в терминологии объектно-ориентированного программирования объекты – это экземпляры класса типа `tObject` [6]), в которых сохраняются данные, относящиеся к конструктивным элементам e_i'' . В рамках статьи нет ни возможности, ни необходимости рассматривать все эти данные, минимально необходимые сведения мы будем приводить по мере описания алгоритмов.

Если элемент e_i'' является резервированной группой элементов, для него создается множество копий $\{e_i^{c''}\}$. Число таких копий равно $e_i'' \cdot n - 1$ ¹, где $e_i'' \cdot n$ - число всех элементов, образующих группу e_i'' . Каждая копия $e_i^{c''}$ повторяет структуру фрагмента всего дерева конструктивной структуры системы, в корне которого (фрагмента) находится элемент e_i'' .

Процесс моделирования осуществляется с использованием так называемого календаря событий (КС) [7]. В начале генерируются и запоминаются в КС случайные значения наработки до отказа для всех отказывающих элементов E_0 . В множество E_0 включаются все простые (отказывающие) элементы, включая простые элементы резервных копий. КС представляет собой массив данных, размещаемый в оперативной памяти компьютера, его элементами являются указатели (ссылки) на соответствующие данные. Запланированные моменты времени отказов элементов сохраняются в переменных $e_i'' \cdot t$ ($\forall e_i'' \in E_0$).

При запуске процесса моделирования начинается последовательный (циклический) просмотр КС. При каждом просмотре КС определяется наименьшее из запланированных значений времени отказа $e_i'' \cdot t$ и это время принимается в качестве текущего модельного времени t , соответствующего текущему событию – в данном случае отказу элемента e_i'' .

¹ «Через точку» обозначаются данные, относящиеся к указанному элементу.

После обработки этого события производится перепланирование времени отказа элемента e_i^u : определяется новое значение $e_i^u.t$, которое записывается в КС вместо прежнего значения.

Обработка события включает такие этапы:

- 1) определение состояния системы в текущий момент времени t (после отказа простого элемента e_i^u);
- 2) перепланирование отказа элемента e_i^u ;
- 3) перепланирование отказов других элементов, входящих в состав элемента e_i^u , в том числе и элементов в резервных копиях.

Помимо указанных этапов при обработке событий также осуществляется накопление статистики, необходимой для вычисления оценок показателей T_0 и T_B , но эти вопросы мы рассматривать не будем.

На рис. 2 изображена структурная схема алгоритма определения состояния системы при отказе элемента e_i^u . Рассмотрим кратко его работу.

Оператор 1 определяет указатель на элемент e_j^{u-1} , в состав которого входит текущий отказавший элемент e_i^u (если говорить строго, то e_j^{u-1} - это указатель на данные, содержащие информацию о соответствующем конструктивном элементе).

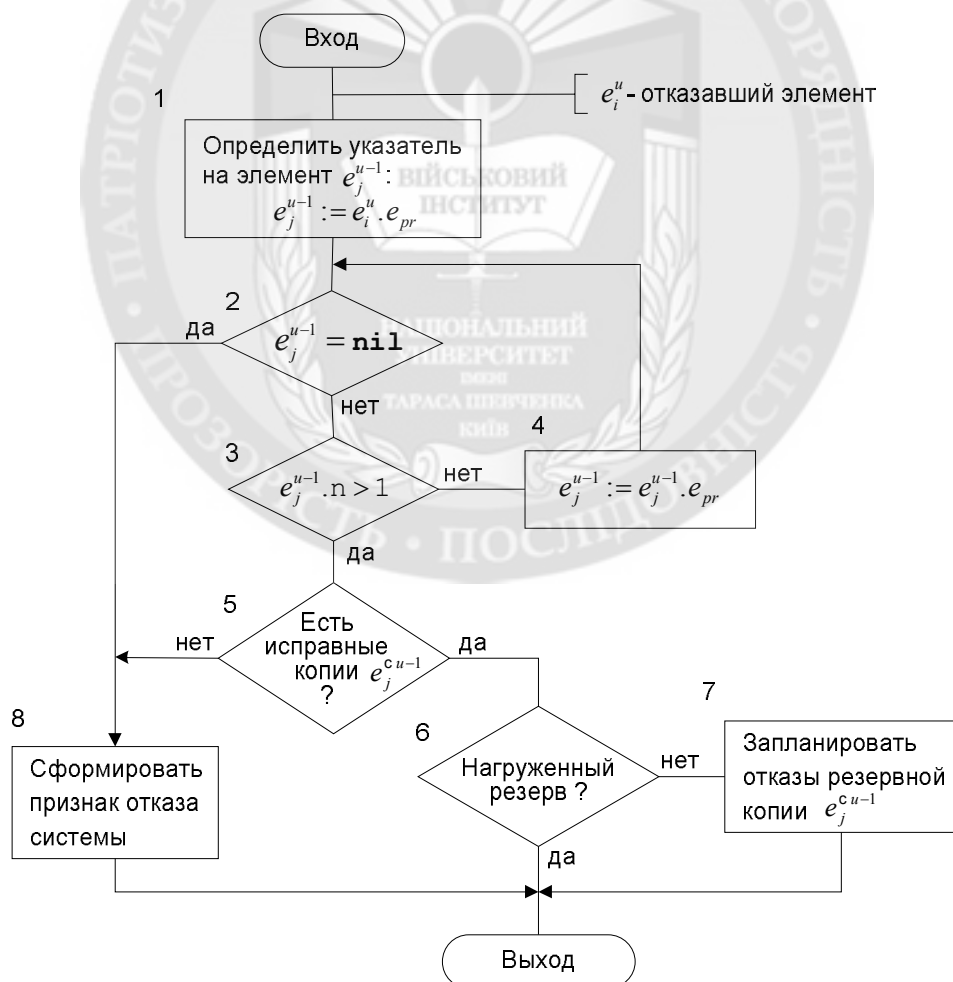


Рис. 2. Алгоритм определения состояния системы после отказа элемента e_i^u

Указатель e_j^{u-1} определяется через ссылку $e_i^u \cdot e_{pr}$ - ссылку на старший элемент, в состав которого входит элемент e_i^u .

Указатель e_j^{u-1} может принять значение nil (пустое значение) только в том случае, если элемент e_j^{u-1} представляет систему в целом, то есть если $e_j^{u-1} = e^0$. Если это происходит ($e_j^{u-1} = nil$), это означает, что отказ элемента e_i^u привел к отказу системы в целом и оператор 2 передает управление оператору 8, после чего работа алгоритма завершается.

Если $e_j^{u-1} \neq nil$, то оператор 3 проверяет, не является ли элемент e_j^{u-1} резервированной группой элементов. Если нет ($e_j^{u-1} \cdot n = 1$), то выполняется оператор 4, который осуществляет переход по ссылке $e_j^{u-1} \cdot e_{pr}$ и тем самым обеспечивает продвижение вверх по ветви дерева конструктивной структуры, ведущей от элемента e_i^u к корню дерева e^0 . Таким образом, операторы 2-4 обеспечивают поиск резервированной группы, в которую может входить отказавший элемент e_i^u .

Если резервированная группа найдена (элемент e_j^{u-1} является резервированной группой), то оператор 5 проверяет, имеются ли у элемента e_j^{u-1} исправные резервные копии. Если да, то выполняются операторы 6,7. Если резервирование постоянное (нагруженное), то ничего делать не надо, так как все резервные копии постоянно включены в работу (расходуют свой ресурс). Если резервирование замещающее (ненагруженное), то вместо отказавшего элемента e_j^{u-1} нужно включить в работу одну из резервных копий $e_j^{c,u-1}$. Для этого нужно в этой копии запланировать отказы для всех, входящих в нее простых элементов (до этого всем значениям $e_k^u \cdot t$ для элементов $e_k^u \in e_j^{u-1}$ были присвоены значения $T_s + 1$, благодаря чему они были временно отключены от механизма моделирования отказов). Это делается оператором 7. После выполнения операторов 6,7 работа алгоритма завершается.

Если в результате исполнения рассмотренного алгоритма был установлен признак отказа системы, то выполняются 2 и 3 этапы обработки текущего события. В результате выполнения этих этапов моделируется восстановление работоспособности системы. Структурная схема алгоритма для этих этапов изображена на рис. 3.

Оператор 1 осуществляет перепланирование отказа элемента e_i^u , отказ которого привел к отказу системы: генерируется новое значение τ случайной наработки до отказа этого элемента и выполняется оператор присваивания $e_i^u \cdot t := t + \tau$. Новое значение $e_i^u \cdot t$ сохраняется в КС.

Оператор 2 определяет указатель e_j^{u-1} на элемент старшего уровня, в состав которого входит элемент e_i^u . Операторы 3-5 определяют, имеется ли резервированная группа старшего уровня, в состав которой входит элемент e_i^u .

Для этого операторами 3-5 осуществляют продвижение вверх по ветви дерева конструктивной структуры до тех пор, пока не будет найдена резервированная группа e_j^{u-1} , в состав которой входил отказавший элемент e_i^u .

Если такая группа не найдена ($e_j^{u-1} = nil$), оператор 3 передает управление оператору 10, который устанавливает признак восстановления системы, и работа алгоритма на этом заканчивается. В противном случае выполняются операторы 6-9.

Оператор 6 осуществляет перепланирование отказов всех отказавших до этого простых элементов, входящих в состав элемента e_j^{u-1} . Если резерв нагруженный, то выполняется оператор 8, который производит перепланирование отказов всех отказавших элементов в резервных копиях e_j^{cu-1} .

В противном случае, если резервирование ненагруженное, оператор 9 переводит все резервные копии в состояние ожидания путем присваивания запланированному времени отказа для всех входящих в них простых элементов $e_i^u \cdot t$ значения $T_3 + 1$. Этим все резервные копии переводятся в выключенное состояние, при котором их ресурс не расходуется.

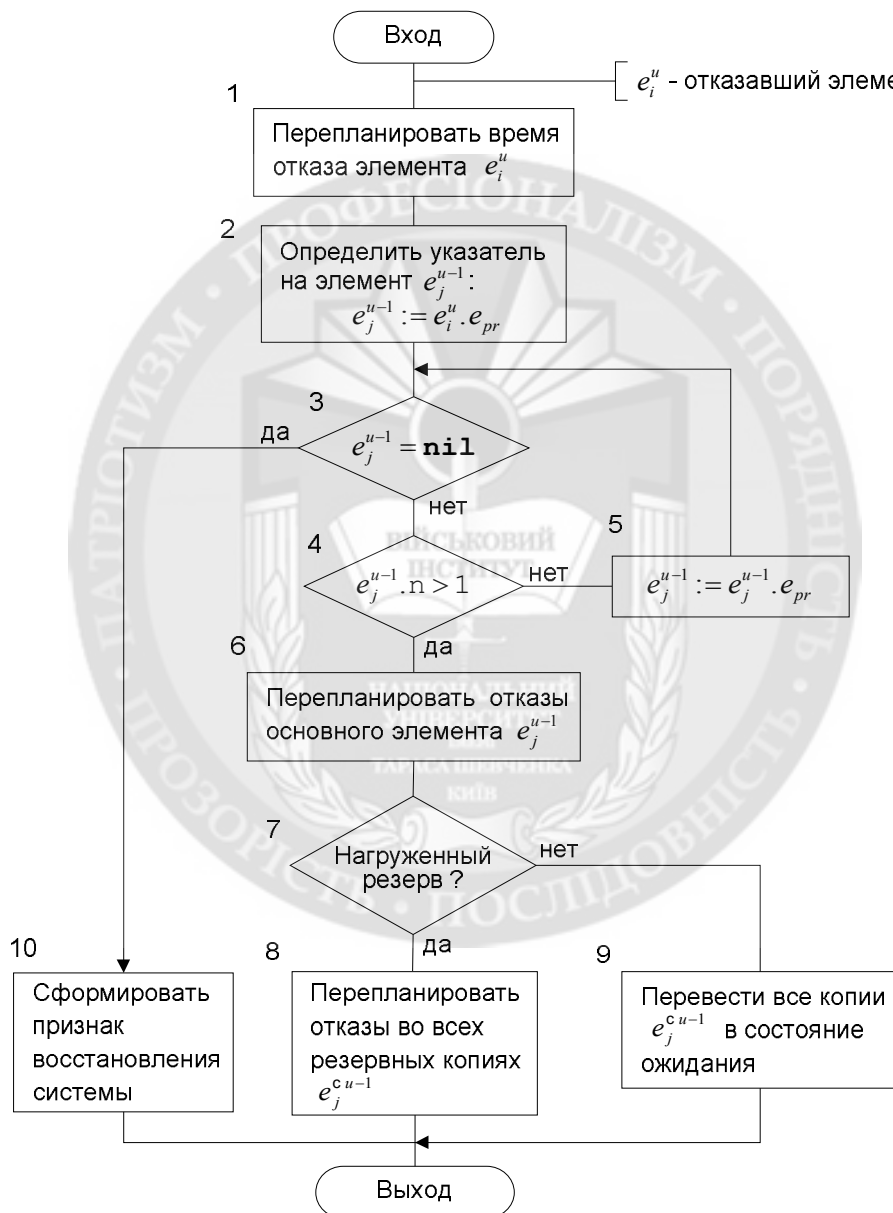


Рис. 3. Алгоритм восстановления работоспособности системы после отказа

При рассмотрении алгоритмов мы умышленно абстрагировались от различных не относящихся к рассматриваемому вопросу деталей модели, в частности, мы не касались вопросов накопления статистики и вычисления оценок для показателей надежности системы. Более полную информацию об алгоритмах моделирования ИСМ можно найти в [5].

Пример моделирования. Для примера возьмем простую систему, для которой дерево иерархической конструктивной структуры изображено на рис. 3. Для нас не имеет значения содержательная сторона примера, поэтому мы не будем пояснять сокращенные наименования элементов, указанных на рисунке.

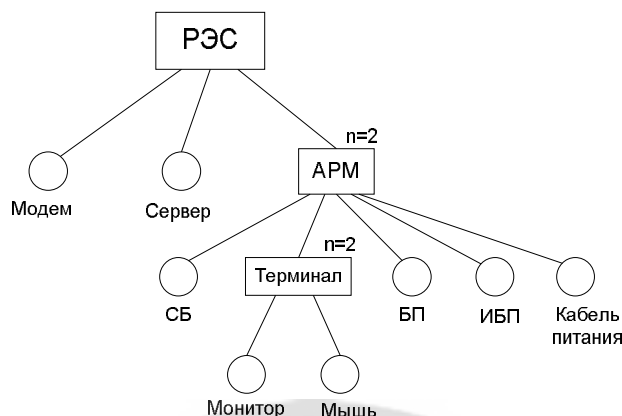


Рис. 3. Дерево конструктивной структуры тестовой системы

Все элементы системы изначально считаются соединенными в смысле надежности последовательно. Для проверки предложенных алгоритмов будем вводить резервирование для составных конструктивных элементов: АРМ и Терминал. Внутренняя надежность структура их изначально также последовательная. Количество резервных элементов в группах будем варьировать. На рис. 4 изображена структурная схема надежности для системы в целом в случае двойного резервирования указанных элементов.

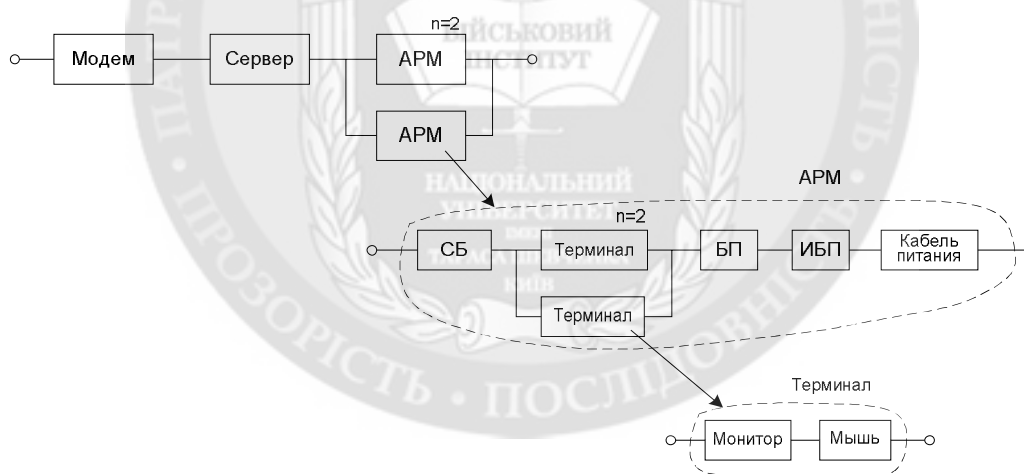


Рис. 4. Иерархическая структурная схема надежности тестовой системы

Отказывающимися элементами, как это было принято выше, являются все простые элементы (элементы нижнего конструктивного уровня). Предполагается, что отказы проявляются мгновенно, восстановление системы начинается сразу после появления отказа.

В исходных данных в качестве модели отказов простых элементов зададим диффузионное немонотонное распределение (*DN*-распределение), которое является наиболее адекватной моделью отказов для изделий радиоэлектронной техники [8].

Параметры *DN*-распределения для всех элементов зададим одинаковыми:

$\mu = 10000$ ч - математическое ожидание (средняя наработка до отказа);

$\nu = 0,8$ - коэффициент вариации.

Среднее время восстановления элементов зададим равным $T_{вi} = 1$ ч.

Продолжительность эксплуатации системы (время, в течение которого осуществляется моделирование отказов), зададим равным 20 лет.

В начале произведем расчеты для случая, если резервирование в системе отсутствует, то есть при $n_{\text{АРМ}} = n_{\text{Терм}} = 1$, где $n_{\text{АРМ}}$ и $n_{\text{Терм}}$ - число элементов в резервированных группах элементов АРМ и Терминал соответственно. В результате таких расчетов мы получили следующие значения показателей надежности системы: $T_0 = 1262$ ч и $T'_b = 1$ ч.

Далее произведем расчеты для случаев резервирования при различных параметрах резервирования и при различных стратегиях восстановления.

Для стратегии восстановления **после отказа системы** были получены результаты, сведенные в табл. 1.

Таблица 1

Показатели надежности системы при резервировании элементов
(восстановления после отказа системы)

| Вариант резервирования | Число элементов в группе | Показатели надежности | | | |
|--|--------------------------|----------------------------|------------|------------------------------|------------|
| | | Нагруженное резервирование | | Ненагруженное резервирование | |
| | | T_0 , ч | T'_b , ч | T_0 , ч | T'_b , ч |
| Резервируется элемент АРМ | 1 | 1262 | 1,0 | 1262 | 1,0 |
| | 2 | 1500 | 1,95 | 4205 | 1,35 |
| | 3 | 1639 | 2,79 | 4842 | 1,48 |
| | 4 | 1731 | 3,63 | 4975 | 1,79 |
| | 5 | 1802 | 4,50 | 5031 | 1,92 |
| Резервируется элемент Терм | 1 | 1262 | 1,0 | 1262 | 1,0 |
| | 2 | 1396 | 1,29 | 1650 | 1,14 |
| | 3 | 1464 | 1,54 | 1680 | 1,16 |
| | 4 | 1504 | 1,78 | 1682 | 1,16 |
| | 5 | 1531 | 2,01 | 1682 | 1,16 |
| Резервируются элементы АРМ и Терм ² | 1 | 1262 | 1,0 | 1262 | 1,0 |
| | 2 | 1633 | 2,29 | 4284 | 1,40 |
| | 3 | 1726 | 2,64 | 4298 | 1,41 |
| | 4 | 1783 | 2,96 | 4306 | 1,42 |
| | 5 | 1823 | 3,26 | 4308 | 1,42 |

В таблице представлены результаты для трех вариантов исходных данных: 1) резервирование вводится на уровне элемента АРМ; 2) резервирование вводится только для элемента Терминал, и 3) резервирование вводится совместно для элементов АРМ и Терминал. Число элементов в резервированных группах варьировалось от 1 до 5. В варианте 3 число резервных элементов АРМ зафиксировано ($n_{\text{АРМ}} = 2$).

Поскольку рассматриваются только одиночные отказы, формально можно предположить, что восстановление системы происходит сразу после восстановления первого из отказавших резервных элементов. При таком подходе среднее время восстановления не

² Изменяется величина $n_{\text{Терм}}$ при фиксированном значении $n_{\text{АРМ}} = 2$.

зависело бы от стратегии восстановления, и в рассматриваемом примере было бы равно $T'_B = 1$ ч. Поэтому в табл. 1 вместо показателя T_B приводятся значения показателя T'_B , который определяется как среднее суммарное время восстановления всех элементов, отказавших к моменту отказа системы в целом.

Полученный характер зависимости показателей T_0 и T'_B от числа резервных элементов вполне соответствует физическому смыслу моделируемых процессов.

Результаты расчетов для стратегии **постоянного восстановления** представлены в табл. 2. Результаты показывают, что в случае стратегии постоянного восстановления показатели надежности системы несущественно зависят от числа резервных элементов. Это легко объясняется тем, что в данном примере $T_B \ll T_0$ и поэтому при каждом отказе происходит практически «мгновенное» восстановление системы и оказывается, что остальные элементы в резервированной группе оказываются как бы «лишними».

Таблица 2

Показатели надежности системы при резервировании элементов
(постоянное восстановление)

| Вариант резервирования | Показатели надежности | |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | Нагруженное резервирование | Ненагруженное резервирование |
| | T_0 , ч | T_0 , ч |
| Резервируется элемент АРМ | 5020÷5046 | 5043÷5057 |
| Резервируется элемент Терм | 1681÷1685 | 1682÷1684 |
| Резервируются элементы АРМ и Терм | 5038÷5047 | 5044÷5052 |

Среднее время восстановления при этом остается неизменным и практически совпадает со средним временем восстановления системы без резервирования (показатель T'_B в этом случае теряет смысл, так как совпадает с T_B), поэтому в табл. 2 мы его не включили.

Точность и адекватность модели с использованием разработанных алгоритмов проверена на простых структурах и при экспоненциальном распределении наработки до отказа элементов, при которых известны точные значения показателя T_0 . Исследования показали, что точность модели в среднем не хуже 10%.

ЛИТЕРАТУРА:

- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. С 01.07.1990.
- Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
- Черкесов Г.Н. надежность аппаратно-программных комплексов. Учебное пособие – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.
- ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Введ. 01.01.1997.
- Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей.

Монографія / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В.Банзак, В.О. Браун [и др.] : под ред. С.В.Ленкова . – Одесса : Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.

6. Дарахвелидзе П.Г., Марков Е.П. Программирование в Delphi 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 784 с.

7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. – 400 с.

8. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

Без рецензії.

**д.т.н., проф. Ленков С.В., к.військ.н., доц. Пашков С.О.,
к.т.н., доц. Осипа В.О., к.т.н., доц. Цицарєв В.М., д.т.н., доц. Боряк К.Ф.
МОДЕЛЮВАННЯ ВІДМОВ СТРУКТУРНО НАДЛИШКОВИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ
СИСТЕМ**

У статті розглядаються алгоритми моделювання відмов структурно надлишкових радіоелектронних систем (РЕС). Для моделювання відмов використовується метод імітаційного статистичного моделювання. У результаті моделювання отримують оцінки показників надійності структурно надлишкової РЕС на заданому періоді її експлуатації. Наводиться приклад моделювання. Точність і адекватність моделі з використанням розроблених алгоритмів перевірена на простих структурах і при експонентному розподілі наробітку до відмови елементів, при яких відомі точні значення показника середнього наробітку на відмову. Дослідження показали, що точність моделі в середньому не гірше 10%.

Ключові слова: надійність, радіоелектронні системи, модель відмов.

**prof. Lenkov S.V., Ph.D. Pashkov S.A., Ph.D. Ossypa V.O.,
Ph.D. Tsytsarev V.M., prof. Borjak K.F.**

SIMULATION OF FAILURES STRUCTURAL SURPLUS ELECTRONIC SYSTEMS

The article deals with modeling algorithms structural failures of redundant electronic systems (RES). To simulate failures simulation method used statistical modeling. As a result of the simulation are indicators of reliability assessment of structural excess of RES in a given period of its operation. An example of modeling. Exactness and model adequacy with the use of the worked out algorithms are checked for simple structures and at exponential distribution of work completely of elements at that the exact meaning of index of middle work is known on a refuse. Researches showed that model exactness on the average not worse 10%%.

Keywords: reliability, electronic system, model failures.