

## **О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЕГО НАДЕЖНОСТИ**

*В статье приводятся результаты исследования влияния конструктивной структуры объекта радиоэлектронной техники (РЭТ) на показатели его надежности. Конструктивная структура объекта представляется иерархической, надежностная структура - последовательно-параллельной. В качестве показателей надежности определяются средняя наработка на отказ (показатель безотказности) и среднее время восстановления (показатель ремонтпригодности). Для определения показателей надежности объекта с учетом его структуры применяется имитационная статистическая модель. Приводится пример результатов моделирования, на котором показывается характер влияния параметров конструктивной структуры объекта РЭТ на показатели его надежности. Показывается, что степень этого влияния существенно зависит от законов распределения наработки до отказов комплектующих элементов.*

*Ключевые слова: объект радиоэлектронной техники, конструктивная структура, показатели надежности, имитационное статистическое моделирование.*

**Введение.** Одной из характерных черт объектов радиоэлектронной техники (РЭТ) является их иерархическая конструктивная структура. Примерами объектов РЭТ могут служить радиолокационные станции, системы радиоэлектронной борьбы, элементы зенитно-

ракетных комплексов и т.п. Характерным признаком объектов РЭТ является наличие в их составе значительного количества (до 80% и более) радиоэлектронных комплектующих элементов. От того, насколько продуманной (оптимальной) является конструктивная структура таких объектов, существенно зависит их надежность, удобство и экономичность процесса технической эксплуатации в целом. При расчетах надежности объектов РЭТ их конструктивная структура неявно всегда учитывается при определении элементов, включаемых в структурную схему надежности (ССН) объекта. Однако стандартные рекомендации по выбору элементов для включения их в ССН отсутствуют, что приводит к определенному произволу в расчетах и, следовательно, к ошибкам в оценках показателей надежности. Величина ошибки при этом может быть различной – это зависит от параметров конструктивной структуры и от вида закона распределения наработки до отказа элементов. В целом эти ошибки невелики и поэтому на практике их часто игнорируют. Однако знать о существовании этих ошибок представляется весьма важным для разработчиков объектов РЭТ.

В данной статье на простом примере раскрывается механизм влияния факторов конструктивной структуры объекта РЭТ на точность расчетов его показателей надежности. В качестве показателей надежности рассматриваются показатель безотказности «средняя наработка на отказ» и показатель ремонтпригодности «среднее время восстановления». Оценки этих показателей определяются с помощью имитационной статистической модели (ИСМ), в которой учитывается иерархическая конструктивная структура объекта. Далее кратко рассматривается формализованное описание конструктивной и надежностной структуры объекта РЭТ, которое используется в ИСМ, определяются основные выражения, в соответствии с которыми вычисляются в модели оценки показателей надежности. Затем приводится пример результатов моделирования.

#### Формализованное описание конструктивной и надежностной структуры объекта.

Конструктивная структура объекта РЭТ представляется деревом  $G = \langle E, R \rangle$ , где  $E$  – множество всех конструктивных элементов объекта;  $R$  – отношение вложенности элементов. Конструктивными элементами объекта могут быть, например, шкафы, блоки, агрегаты, узлы и т.п. Условимся произвольный конструктивный элемент обозначать  $e_i^u$ , где  $u$  – номер конструктивного уровня (уровень вложенности) элемента,  $i$  – порядковый номер (индекс) элемента. Номер конструктивного уровня отсчитывается от корневой вершины  $e^0$ , которая представляет объект в целом. Отношение  $R$  представляет собой множество пар вида  $\langle e_i^u, e_j^{u-1} \rangle$ , в которых элемент  $e_i^u$ , стоящий на первом месте, является элементом, непосредственно входящим в состав элемента  $e_j^{u-1}$  ( $\langle e_i^u, e_j^{u-1} \rangle \in R$ ).

Множество всех элементов  $(u+1)$ -го уровня, которые непосредственно входят в состав

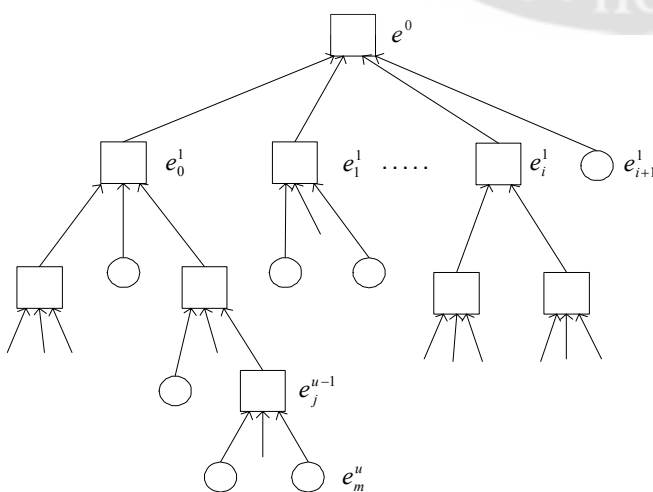


Рис. 1. Дерево конструктивной структуры объекта

элемента  $e_i^u$ , обозначим  $E(e_i^u)$ . Множество  $E(e_i^u)$  через отношение  $R$  можно определить как сечение по элементу  $e_i^u$  симметричного к  $R$  отношения  $R^{-1}$ :  $E(e_i^u) = R^{-1}(e_i^u)$ . Симметричное отношение  $R^{-1}$  представляет собой множество всех пар  $\langle e_j^{u-1}, e_i^u \rangle$ , полученных путем перестановки элементов  $e_i^u$  и  $e_j^{u-1}$  в соответствующих парах отношения  $R$  [1].

Элементы, в составе которых имеются другие элементы, условимся называть *составными*. Если состав

элемента не детализируется (не определяются в его составе какие-либо другие конструктивные элементы), то такой элемент будем называть *простым*. Простой элемент в действительности может представлять собой достаточно сложное техническое изделие, однако в данном конкретном случае нас не интересуют его внутреннее устройство. Примерный вид дерева  $G$  показан на рис. 1. Стрелки указывают направление вхождения элементов. Составные элементы изображены прямоугольниками, простые – кружками. На нижнем уровне конструктивной структуры должны быть представлены наименьшие элементы, разборка которых в условиях эксплуатации невозможна или нецелесообразна. Дерево  $G$  должно быть построено таким образом, чтобы в нем были представлены все потенциально съемные и заменяемые в процессе эксплуатации элементы.

Будем полагать для простоты, что объект имеет последовательную надежность структуру<sup>1</sup>. Это значит, что отказ произвольного элемента  $e_i^u \in E$  возникает в случае, если откажет хотя бы один из элементов  $e_j^{u+1} \in E(e_i^u)$ . С учетом этого вероятность безотказной работы элемента  $e_i^u$  определяется как произведение

$$p(e_i^u) = \prod_{\forall e_j^{u+1} \in E(e_i^u)} p(e_j^{u+1}). \quad (1)$$

Вероятность безотказной работы объекта в целом может быть определена следующей цепочкой формул:

$$p(e^0) = \prod_{e_1^1 \in E(e^0)} \prod_{e_{ij}^2 \in E(e_1^1)} p(e_{ij}^2) = \dots = \prod_{e_m \in E_0} p(e_m), \quad (2)$$

где  $E_0$  - множество всех простых элементов (элементов нижнего конструктивного уровня).

Условие (1) является *условием полноты* конструктивной структуры объекта, представляемой деревом  $G$ . Соблюдение этого условия обеспечивает корректность дальнейших вычислений показателей надежности объекта с учетом его иерархической конструктивной структуры.

**Понятие множества восстанавливаемых элементов.** Согласно принятому формальному описанию структуры объекта причиной его отказа всегда является отказ какого-либо из элементов нижнего конструктивного уровня (или элемента, находящегося внутри простого элемента). Восстановление работоспособности объекта производится путем замены конструктивного элемента, в составе которого находится отказавший элемент. Очевидно, что из соображений экономичности обслуживающий персонал будет стремиться производить замену элемента как можно более низкого конструктивного уровня. Однако из-за конструктивных особенностей объекта может оказаться, что проще произвести замену элемента более высокого конструктивного уровня.

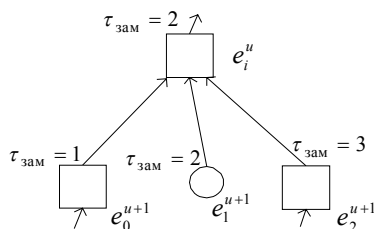


Рис. 2. Фрагмент дерева конструктивной структуры

Пусть для примера элемент  $e_i^u$  состоит из трех конструктивных элементов  $e_0^{u+1}$ ,  $e_1^{u+1}$  и  $e_2^{u+1}$  (рис. 2). В соответствии с принятым допущением о последовательном надежном соединении элементов отказ элемента  $e_i^u$  происходит в случае отказа одного из элементов  $e_0^{u+1}$ ,  $e_1^{u+1}$  или  $e_2^{u+1}$ . На рис. 2 рядом со значком элемента указана продолжительность его замены  $\tau_{\text{зам}}$ .

Если откажет элемент  $e_0^{u+1}$  или  $e_1^{u+1}$ , то восстановление работоспособности объекта целесообразно производить путем замены соответственно

<sup>1</sup> Это ограничение в дальнейшем может быть снято.

элемента  $e_0^{u+1}$  или  $e_1^{u+1}$ . Если откажет элемент  $e_2^{u+1}$ , то целесообразно заменять весь элемент  $e_i^u$ . Очевидно, что так следует действовать в том случае, если критерием эффективности замен является условие минимизации времени восстановления объекта.

Введем понятие *множества восстанавливаемых элементов* (обозначим его  $E_B$ ) следующим образом: в множество  $E_B$  включаются все элементы, которые с наибольшей вероятностью будут заменяться при отказах объекта в процессе его эксплуатации.

Обозначим  $W$  отношение, с помощью которого будем устанавливать соответствие между отказывающимися и восстанавливаемыми элементами. Отношение  $W$  представляет собой множество пар  $\langle e_i^u, e_j^m \rangle$ , в которых  $e_i^u \in E_0$  – отказывающийся элемент, а  $e_j^m \in E_B$  – элемент, который будет заменяться в случае отказа элемента  $e_i^u$  ( $W \subset E_0 \times E_B$ ). Можно сказать, что отношением  $W$  определяется функциональное отображение  $W: E_0 \rightarrow E_B$ , то есть каждому элементу  $e_i^u$  соответствует один восстанавливаемый элемент  $e_j^m$ . С учетом этого для заданного отказавшего элемента  $e_i^u$  соответствующий ему восстанавливаемый элемент можно определять как  $W(e_i^u)$ .

Обозначим  $P(e_i^u)$  *путь*, соединяющий вершину  $e_i^u$  с корневой вершиной  $e^0$  графа  $G$ . Путь  $P(e_i^u)$  можно представить последовательностью вершин  $(e_i^u, e_j^{u-1}, \dots, e^0)$ , связанных попарно отношением вложенности  $R$ . Поскольку  $G$  – это дерево, путь  $P(e_i^u)$  является единственным.



Рис. 3. Алгоритм формирования множества  $E_B$

С учетом введенных обозначений можно предложить следующий алгоритм формирования множества  $E_B$  (рис. 3). Входной информацией для алгоритма являются данные о составе и структуре объекта:  $E, G, E_0$ , данные о времени восстановления конструктивных элементов  $\{\tau_b(e_i); e_i \in E\}$ . Оператором 1 создается вспомогательное множество  $E'_0$ , тождественное множеству  $E_0$ , иницируются вначале пустые множества  $E_B$  и  $W$ . Оператор 2 выбирает из  $E'_0$  произвольный элемент  $e_i$ . Оператором 3 строится путь  $P(e_i)$ . Оператор 4 отыскивает среди элементов пути  $P(e_i)$  элемент  $e_k$ , для которого время восстановления  $\tau_b(e_i)$  минимально. Оператор 5 добавляет в множество  $E_B$  элемент  $e_k$ , в множество  $W$  добавляет пару  $\langle e_i, e_k \rangle$ . Оператор 6 удаляет из вспомогательного множества  $E'_0$  использованный элемент  $e_i$ . Если множество  $E'_0$  не пусто, оператор 7 передает управление оператору 2 для продолжения процесса формирования множеств  $E_B$  и  $W$ . Работа алгоритма завершается, когда после очередного цикла исполнения операторов 2-6 окажется, что множество

$E'_0$  пусто.

**Определение показателей надежности с учетом конструктивной структуры объекта.** В качестве показателей надежности, как уже отмечалось, будем рассматривать показатель безотказности «средняя наработка на отказ»  $T_0$  и показатель ремонтпригодности «среднее время восстановления»  $T_B$  [2]. В соответствии с произведенной выше

формализацией параметры конструктивной структуры объекта будем представлять графом  $G$  и отображением  $W$ . С учетом этого в общем случае формулы для определения показателей  $T_0$  и  $T_B$  будут следующие:

$$T_0(G, W) = T_3 \int_0^{T_3} \Omega(t/G, W) dt; \quad T_B(G, W) = \sum_{i \in I_0} \frac{T_{0i}(G, W)}{T_0} \tau_B(W(e_i)), \quad (3)$$

где  $\Omega(t/G, W)$  - функция параметра потока отказов объекта;

$T_3$  - продолжительность эксплуатации объекта;

$T_{0i}(G, W)$  - средняя наработка на отказ  $i$ -го элемента ( $e_i \in E_0$ );

$\tau_B(W(e_i))$  - среднее время восстановления  $i$ -го элемента;

$I_0$  - множество номеров (индексов) всех простых элементов ( $|I_0| = |E_0|$ ).

По аналогии с  $T_0$  величина  $T_{0i}$  определяется по формуле:

$$T_{0i}(G, W) = T_3 \int_0^{T_3} \omega_i(t/(G, W)) dt, \quad (4)$$

где  $\omega_i(t/(G, W))$  - параметр потока отказов  $i$ -го элемента ( $\Omega(t/G, W) = \sum_{i \in I_0} \omega_i(t/G, W)$ ).

Внешне простые и прозрачные формулы (3)-(4) оказываются достаточно сложными для их реализации. Сложность состоит в определении функции  $\Omega(t/G, W)$  (или  $\omega_i(t/(G, W))$ , что одно и то же) – к сожалению, определить эту функцию в аналитическом виде не представляется возможным. Единственным выходом в данном случае остается применение метода статистического моделирования [3]. О необходимости применения в подобных задачах метода статистического моделирования утверждается, в частности, в [4]. В настоящей статье мы воспользуемся разработанной ранее с участием авторов имитационной статистической модели [5], которая реализована программно (программа ISMPN).

**Пример расчетов и выводы.** В качестве тестового примера для расчетов показателей  $T_0$  и  $T_B$  с учетом конструктивной структуры возьмем объект, состоящий из 8 одинаковых простых элементов, конструктивно входящих в элементы более высоких конструктивных уровней, как это показано на рис. 4. Все простые элементы (на рисунке обозначены кружками) имеют одинаковое значение средней наработки до отказа  $T_{срi} = 10000$  ч. В смысле надежности все элементы считаются соединенными последовательно.

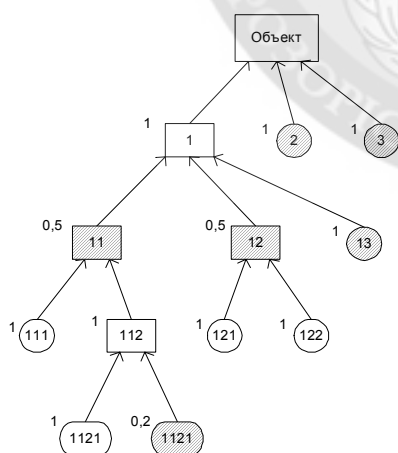


Рис. 4. Дерево конструктивной структуры тестового объекта (граф  $G$ ).

В программе ISMPN [5], с помощью которой мы будем производить расчеты, имеется возможность задавать для простых элементов один из двух законов распределений наработки до отказа: диффузионное немонотонное ( $DN$ ) или экспоненциальное ( $E$ ) распределение.  $DN$ -распределение считается наиболее универсальной моделью отказов для элементов радиоэлектронной техники [6], и поэтому используется в практических расчетах для объектов РЭТ.  $E$ -распределение является

теоретической моделью, которая используется, в основном, для верификации результатов моделирования.

В рассматриваемом примере будем полагать, что все конструктивные элементы являются потенциально съёмными. Система диагностирования объекта позволяет определять состояние объекта с точностью до простого элемента.

Расчеты произведем для трех вариантов конструкции, которые различаются временем замены отдельных элементов (конструктивная структура остается неизменной):

1) Вариант 1 – все элементы имеют одинаковое время замены  $\tau_{зам i} = 1$  ч. Очевидно, что это заведомо нереальный вариант и его мы вводим только в качестве базового варианта, с которым будем сравнивать результаты, получаемые для двух других вариантов конструкции;

2) Вариант 2 – для элементов 11 и 12 конструкция изменена таким образом, что их можно заменить за время  $\tau_{зам 11} = \tau_{зам 12} = 0,5$  ч. Это вариант, несколько улучшенный по сравнению с конструкцией варианта 1;

3) Вариант 3 отличается от варианта 2 изменением конструкции элемента 1122, в результате чего время его замены  $\tau_{зам 1122} = 0,2$  ч. Это вариант, еще улучшенный по сравнению с вариантом 2.

Очевидно, что для каждого из этих вариантов будут «свои» подмножества восстанавливаемых элементов  $E_b$ :

$$E_{b1} = \{111, 1121, 1122, 121, 122, 13, 2, 3\};$$

$$E_{b2} = \{11, 12, 13, 2, 3\};$$

$$E_{b3} = \{11, 1122, 12, 13, 2, 3\}.$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов, полученные для этих трех вариантов конструкции при различных законах распределения наработки до отказа элементов: для *DN*-распределения (для двух значений коэффициента вариации  $\nu$ ), и для *E*-распределения. Моделирование для случая *E*-распределения позволило, с одной стороны, подтвердить адекватность модели (так как только для *E*-распределения может быть рассчитано точное теоретическое значение средней наработки до отказа  $T_0$ ), а, с другой стороны, показать, как закон распределения наработки до отказа элементов влияет на получаемые показатели  $T_0$  и  $T_b$ . Расчеты производились для периода эксплуатации  $T_s = 20$  лет.

Приведенные значения  $T_0$  и  $T_b$  являются соответствующими статистическими оценками, величина  $\varepsilon$  – это 95%-й доверительный интервал относительной ошибки для оценки  $T_0$ .

Таблица 1

Результаты расчетов

Модель отказов элементов	Показатели	Полученные значения показателей		
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
<i>DN</i> -распределение ( $\nu = 1,0$ )	$T_0$ , ч	1250	1366	1334
	$T_b$ , ч	1,0	0,71	0,67
	$\varepsilon$	0,033	0,025	0,035
<i>DN</i> -распределение ( $\nu = 0,8$ )	$T_0$ , ч	1263	1503	1453
	$T_b$ , ч	1,0	0,72	0,69
	$\varepsilon$	0,029	0,035	0,034
<i>E</i> -распределение	$T_0$ , ч	1252	1253	1253
	$T_b$ , ч	1,0	0,69	0,65
	$\varepsilon$	0,027	0,043	0,038

Полученные результаты расчетов позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Фактическая конструктивная структура сложного технического объекта в общем случае существенно влияет на показатели надежности объекта  $T_0$  и  $T_b$ . Увеличение  $T_0$  (вар. 2) объясняется тем, что при замене восстанавливаемых элементов одновременно заменяются

(обновляются) также элементы, которые на данный момент еще исправны и не выработали свой ресурс, вследствие чего показатель  $T_0$  возрастает. Уменьшение  $T_0$  (вар. 3 по сравнению с вар. 2) происходит за счет уменьшения среднего количества заменяемых простых элементов.

Уменьшение среднего времени восстановления  $T_v$  (вар. 2 и 3) не зависит от вида закона распределения наработки до отказа элементов, это очевидным образом происходит вследствие того, что заменяются элементы, требующие меньшего времени на их замену.

2. Степень возрастания средней наработки на отказ  $T_0$  зависит от относительной доли обновляемых при восстановлении элементов, и для реальных сложных технических объектов может быть невелика. Уменьшение среднего времени восстановления  $T_v$  за счет рациональной конструктивной структуры объекта может быть весьма существенным, поэтому фактор влияния конструктивной структуры объекта на показатель  $T_v$  является основным и его обязательно необходимо учитывать при конструировании объекта.

3. Влияние параметров конструктивной структуры на показатель безотказности  $T_0$  тем заметнее, чем более существенными для данного объекта являются факторы износа и старения. Мерой фактора износа и старения является величина коэффициента вариации  $v$  – чем меньше величина  $v$ , тем более интенсивным (ярко выраженным) является процесс деградации, приводящий к отказу. Для нестаряющегося объекта (при  $E$ -распределении наработки до отказа элементов) конструктивная структура никак не влияет на показатель  $T_0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Р. Фор, А. Кофман, М. Дени-Папен. Современная математика. М.: Изд. «Мир», 1966. – 272 с.
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. – 400 с.
4. Ушаков И. А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 132 с.
5. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей. Монография / 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. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

Без рецензії.

к.т.н., доц. Цицарєв В.М., д.т.н., проф. Ленков С.В., к.т.н., доц. Браун В.О., Проценко Я.М.  
**ПРО ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНОЇ СТРУКТУРИ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ  
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ НА ПОКАЗНИКИ ЙОГО НАДІЙНОСТІ**

*У статті наводяться результати дослідження впливу конструктивної структури об'єкта радіоелектронної техніки (РЕТ) на показники його надійності. Конструктивна структура об'єкта представляється ієрархічною, надійнісною структурою - послідовно-паралельною. В якості показників надійності визначаються середнє напрацювання на відмову (показник безвідмовності) і середній час відновлення (показник ремонтпридатності). Для визначення показників надійності об'єкта з урахуванням його структури застосовується імітаційна статистична модель. Наводиться приклад результатів моделювання, на якому показується характер впливу параметрів конструктивної структури об'єкта РЕТ на показники його надійності. Показується, що ступінь цього впливу істотно залежить від законів розподілу наробітку до відмов комплектуючих елементів. Ключевые слова: объект радиоэлектронной техники, конструктивная структура, показатели надежности, имитационное статистическое моделирование.*

*Ключові слова: об'єкт радіоелектронної техніки, конструктивна структура, показники надійності, імітаційне статистичне моделювання.*

**Ph.D. Tsytsarev V.M., prof. Lenkov S.V., Ph.D. Braun V.O., Protsenko Ya.M.  
ON THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE COMPLEX OBJECTS  
RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT INDICATORS FOR ITS OF RELIABILITY**

*The article presents the results of investigation of the constructive structure of the object of electronic technology (RET) on the performance of its reliability. Constructive hierarchical structure of the object appears, the reliability of the structure - a series-parallel. As indicators of reliability defined MTBF (reliability index) and mean time to repair (maintainability index).*

*To determine the reliability indices of the object in view of its structure applies simulation statistical model. An example of the simulation results, which shows the character of the influence of structural parameters on the structure of the object RET performance of its reliability. It is shown that the degree of this effect depends essentially on the laws of distribution of time to failure of components elements.*

*Keywords: object of electronic equipment, the constructive structure, reliability, simulation statistical modeling.*