УДК 681.3(07)

С.В. Ленков, С.А. Пашков, В.А. Осыпа, В.Н. Цыцарев

Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев

О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНОЙ СТРУКТУРЫ ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ОБЪЕКТА НА ЕГО ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

В статье строится математическая модель, устанавливающая зависимость показателей надежности восстанавливаемого технического объекта от параметров его конструктивной структуры. Конструктивная структура объекта предполагается иерархическая. Показано, что параметры конструктивной структуры заметно влияют на показатели надежности объекта только в том случае, если расчет надежности производится с учетом процессов износа и старения элементов.

Ключевые слова: *математическая модель, параметры конструктивной структуры, расчет надежности, процессов износа.*

Введение

Рассматриваемые технические объекты представляют собой сложные технические изделия, состоящие из большого количества разнотипных комплектующих элементов (десятки, сотни тысяч), в составе которых могут быть радиоэлектронные, механические, электромеханические, гидравлические и другие типы элементов. Типичным примером таких объектов являются радиолокационные станции, автоматизированные системы управления различного назначения и т.п. Рассматриваемые объекты относятся к классу восстанавливаемых объектов, предназначенных для длительного многократного использования, для обеспечения высокой эффективности их применения требуется высокий уровень их надежности.

Уровень эксплуатационной надежности объектов, о которых здесь идет речь, зависит не только от надежности комплектующих элементов и от надежностной структуры, но также и от их свойства ремонтопригодности, которое, в свою очередь, существенно зависит от параметров конструктивной структуры объекта. Настоящая статья посвящена мало исследованному вопросу о влиянии конструктивной структуры сложного технического объекта на показатели его надежности.

1. Расчетные формулы для показателей надежности

Будем рассматривать два наиболее важных показателя надежности восстанавливаемых объектов [1]: T_o - средняя наработка на отказ (показатель безотказности), и $T_в$ - среднее время восстановления (показатель ремонтопригодности).

Для этих показателей в случае последовательной надежностной структуры объекта справедливы следующие математические выражения [2]:

$$T_o = 1/\bar{\omega} = 1\Big/\sum_{i\in E_0} \bar{\omega}_i \;; \qquad (1)$$

$$T_в = \sum_{i\in E_0} \tau_{вi}\bar{\omega}_i \Big/ \sum_{i\in E_0} \bar{\omega}_i \,, \qquad (2)$$

где $\bar{\omega}$ - среднее значение параметра потока отказов объекта; $\bar{\omega}_i$ - среднее значение параметра потока отказов i-го элемента объекта; $\tau_{вi}$ - среднее время восстановления объекта при отказе i-го элемента; E_o - множество «отказывающих» элементов (множество всех элементов, включенных в структурную схему надежности объекта).

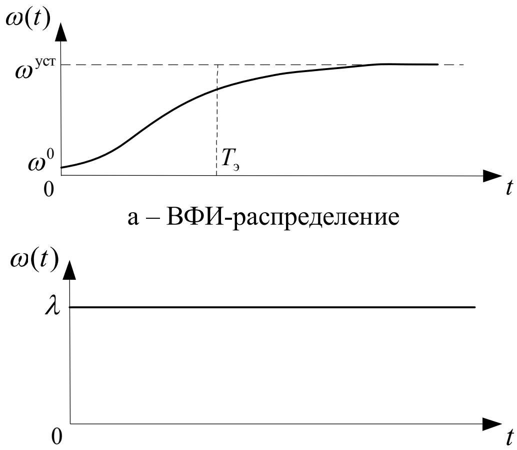
Величина $\bar{\omega}_i$ определяется следующим очевидным выражением:

$$\bar{\omega}_i = \frac{1}{T_э}\int_0^{T_э} \omega_i(t)dt \,, \qquad (3)$$

где $\omega_i(t)$ - функция параметра потока отказов *i*-го элемента; $T_э$ - рассматриваемый период эксплуатации объекта.

Рассматриваемые технические объекты всегда в той или иной степени подвержены деградационным процессам износа и старения. Поэтому в качестве модели отказов элементов объекта необходимо использовать какое-либо из неэкспоненциальных распределений наработки до отказа, имеющее возрастающую функцию интенсивности отказов (ВФИ-распределение) [3]. Только ВФИ-распределение может быть адекватной моделью отказов элементов, подверженным влиянию различных факторов износа и старения. Экспоненциальное распределение является недопустимо грубой моделью отказов для реальных технических объектов [4].

Если в качестве модели отказов элементов использовать какое-либо из ВФИ-распределений, то характерный вид функции параметра потока отказов $\omega(t)$ примерно такой, как это показано на рис. 1, а. Начальное значение ω^0 определяет уровень безотказности, обусловленный так называемыми производственными отказами (в большинстве случаев величина ω^0 близка к 0 и ей можно пренебречь).



а – ВФИ-распределение

б – экспоненциальное распределение

Рис. 1. Характерный вид функции параметра потока отказов ω (t)

При больших значениях *t* наступает установившийся режим процесса отказов-восстановлений объекта и функция $\omega(t)$ стремится к некоторому установившемуся значению $\omega^{уст}$. В большинстве случаев сложные технические объекты «не доживают» до времени наступления этого установившегося режима. Более того, большая часть элементов объекта вообще не отказывает за все время эксплуатации объекта $T_э$.

В случае, если в качестве модели отказов используется экспоненциальное распределение, функция $\omega(t)$ вырождается в прямую линию, как это показано на рис 1, б, где λ - интенсивность отказов, которая является единственным параметром экспоненциального распределения ($\lambda = \text{const}$). По рис. 1, б хорошо видно, что при экспоненциальной модели отказов надежность объекта (элемента) в начальный момент времени точно такая же, как и по прошествии неограниченно большого периода времени, что, очевидно, противоречит реальной действительности.

2. Конструктивная структура объекта

Конструктивная структура сложных технических объектов, как правило, является иерархической. Это значит, что в составе объекта можно выделить конструктивные элементы 1-го уровня, в составе элементов 1-го уровня выделяются элементы 2-го уровня и т.д. Например, объект может состоять из агрегатов (шкафов), агрегаты – из узлов (блоков), узлы – из сборок (плат, ячеек), и т.д. Иерархическую конструктивную структуру объекта формально будем представлять графом (деревом) $G = \langle E, V \rangle$, где $E = \{e_i^u\}$ - множество всех вершин графа, $V = \{v_i\}$ - множество дуг (ребер), соединяющих вершины. В обозначении элемента e_i^u верхний индекс – это номер конструктивного уровня (отсчитываемый от корня дерева), нижний – порядковый номер (индекс) элемента. Корневая вершина e^0 соответствует объекту в целом.

Таким образом, вершины графа представляют отдельные конструктивные элементы объекта, а соединяющие их дуги (ребра) определяют отношение вхождения элементов нижних конструктивных уровней в элементы более высоких (старших) уровней. На рис. 2 дерево G изображено графически. Составные конструктивные элементы (элементы, содержащие в своем составе другие конструктивные элементы) изображены прямоугольниками, простые элементы (элементы, рассматриваемые как одно целое) кружками. Простые элементы в действительности могут представлять собой сколь угодно сложные технические устройства, состав которых не детализируется. Это, например, может быть в случае неразборных элементов, которые в процессе эксплуатации могут заменяться только целиком.

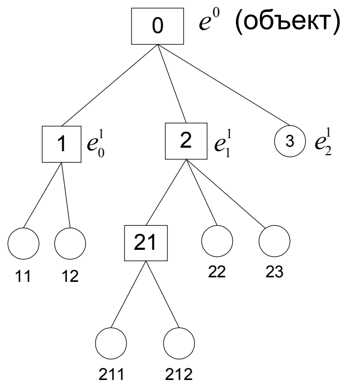


Рис. 2. Дерево конструктивной структуры

Множество всех простых элементов обозначим $E_o^{пр}$ ($E_o^{пр} \subset E$). Через $E(e_i^u)$ условимся обозначать множество элементов (*u*+1)-го уровня, которые непосредственно входят в состав элемента e_i^u. Если элемент e_i^u простой, то $E(e_i^u) = \varnothing$.

3. Расчет показателей безотказности с учетом конструктивной структуры объекта

При расчете надежности всегда составляется в том или ином виде структурная схема надежности (ССН) объекта, которая является одним из способов представления условия работоспособности объекта. Элементами ССН являются конструктивные элементы, отказы которых приводят к отказам объекта, и эти же элементы подлежат восстановлению (замене) в случае их отказов.

Все элементы, включаемые в ССН, мы ранее определили как множество отказывающих элементов E_o. От выбора множества зависит корректность расчетов ПН по формулам (1) и (2), в которых множество E_o является параметром.

Вначале более детально рассмотрим существующую связь между множеством E_o и конструктивной структурой объекта. Теоретически существует весьма большое число вариантов выбора конструктивных элементов из полного множества *E* для включения их в множество E_o. Для обеспечения корректности расчетов ПН необходимо, чтобы множество E_o удовлетворяло условиям полноты и неизбыточности.

Требование полноты заключается в том, что в множество E_o должны быть включены все элементы, отказы которых могут привести к отказу объекта. Формально условие полноты множества E_o можно определить таким логическим выражением:

$$\forall e_m \in E_o^{пр} : \mathsf{P}(e_m) \cap E_o \neq \varnothing , \qquad (4)$$

где $\mathsf{P}(e_m)$ - путь, соединяющий вершину e_m (простой элемент) дерева G с его корневой вершиной e^0, представляющей объект в целом.

Условие (4) словами можно пояснить также следующим образом: для каждого пути $\mathsf{P}(e_m)$ должен быть хотя бы один элемент, принадлежащий множеству E_o.

Требование неизбыточности состоит в том, что любой путь между корнем дерева G и любой его висячей вершиной (путь $\mathsf{P}(e_m)$) должен содержать не более одного элемента, принадлежащего множеству E_o. Формально это требование представляется условием:

$$\forall e_m \in E_o^{пр} : \left| \mathsf{P}(e_m) \cap E_o \right| = 1 , \qquad (5)$$

где прямые скобки $|\cdot|$ обозначают операцию определения числа элементов множества.

Таким образом, условие (5) – это всего лишь дополнение требования (4) требованием того, чтобы элемент, принадлежащий пересечению $\mathsf{P}(e_m) \cap E_o$, был единственным.

Очевидно, что множество всех простых элементов $E_o^{пр}$ всегда является и полным и неизбыточным. Множество $\{E_o\}$ всех допустимых вариантов множеств E_o, удовлетворяющих требованиям (4) и (5), можно получить (сгенерировать), например, следующим образом. Введем оператор Q, с помощью которого множество $E_{oi} \in \{E_o\}$ преобразуется в множество E_{oj}:

$$Q(E_{oi}, e_k) : E_{oi} \xrightarrow{e_k} E_{oj} , \qquad (6)$$

где e_k - элемент, принадлежащий множеству E_{oi}.

Результатом применения оператора $Q(E_{oi}, e_k)$, является множество E_{oj}, которое получается из множества E_{oi} путем подстановки в него вместо элемента e_k подмножества входящих в него элементов $E(e_k)$ ($E_{oi}, E_{oj} \in \{E_o\}$).

Если в качестве исходного взять множество $E_{oi} = \{e^0\}$ и применить к нему оператор (6), то получим множество $E_{oj} = E(e^0)$ (для структуры, показанной на рис. 2, $E(e^0) = \{e_0^1, e_1^1, e_2^1\}$).

Нетрудно видеть, что, если далее последовательно (рекуррентно) применять оператор (6) ко всем получаемым таким образом множествам E_{oj}, то в результате мы получим все допустимые варианты множества E_o. На завершающем шаге этого процесса получим множество E_{oj}, совпадающее с множеством всех простых элементов $E_o^{пр}$.

Суть данного процесса легко пояснить с помощью рис. 3, на котором показаны все варианты множества E_o для структуры, изображенной на рис. 2.

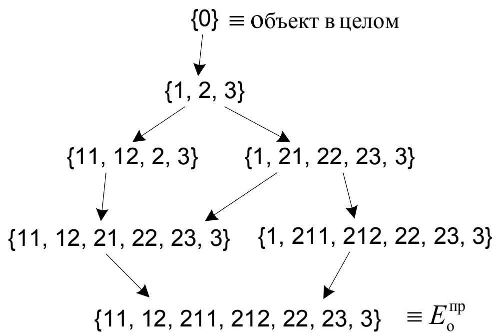


Рис. 3. Все варианты множества E_o

На множестве $\{E_o\}$, которое порождается рассмотренным выше процессом, существует *отношение доминирования* (обозначим его ρ) [5]. Для двух произвольных множеств E_{oi} и E_{oj}, взятых из $\{E_o\}$, множество E_{oi} доминирует над множеством E_{oj} (записывается это $E_{oi} \rho E_{oj}$), если множество E_{oj} было порождено в результате применения оператора (6) к множеству E_{oi}.

Используя введенные понятия, сделаем следующее **утверждение**: если множество E_{oi} доминирует над множеством E_{oj}, тогда расчетное значение средней наработки на отказ $T_o(E_{oi})$, полученное по формуле (1) при условии, что в качестве E_o принято множество E_{oi}, всегда будет больше соответствующего значения $T_o(E_{oj})$, полученного при принятии в качестве E_o множества E_{oj}. В сжатой форме это утверждение записывается так:

если $E_{oi} \rho E_{oj}$, тогда для всех $E_{oi}, E_{oj} \in \{E_o\}$

$$T_o(E_{oi}) \geq T_o(E_{oj}) , \qquad (7)$$

где $T_o(E_{oi})$ и $T_o(E_{oj})$ - найденные по формуле (1) значения средней наработки на отказ объекта при принятии в качестве множества отказывающих элементов E_o множеств E_{oi} и E_{oj} соответственно.

Физически это утверждение (7) обосновывается следующим образом. Если $E_{oi}\,\rho\,E_{oj}$, тогда в E_{oi} есть элемент e_i^u (по которому множество E_{oi} доминирует над множеством E_{oj}), при отказах-восстановлениях которого наряду с заменой отказавшего элемента происходит замена также значительного количества исправных элементов, входящих в состав e_i^u.

И чем выше конструктивный уровень элемента e_i^u (чем меньше номер уровня *u*), тем большим оказывается количество «попутно» заменяемых простых элементов и, следовательно, более высоким будет средний уровень безотказности объекта.

Очевидно, что утверждение (7) имеет смысл только в случае ВФИ-распределения наработки до отказа элементов. В случае экспоненциального распределения (в случае использования модели отказов нестареющих элементов) показатель безотказности T_o не зависит от выбора множества E_o (в условии (7) неравенство превращается в строгое равенство).

Таким образом, в зависимости от выбора множества E_o расчетная величина T_o будет изменяться в некотором интервале от $T_{o\min}$ при $E_o = E_o^{пр}$ до $T_{o\max}$ при $E_o = \{e^0\}$ (см. рис. 4 а).

Из приведенного анализа следует, что для адекватности расчетов ПН необходимо принимать в качестве E_o такое множество, которое будет наиболее близко к варианту, который будет реализовываться на практике. В действительности реализуется только один из вариантов или некоторое весьма узкое их подмножество, так как в процессе эксплуатации при отказах объекта заменяться (восстанавливаться) будут только те конструктивные элементы, для замены которых требуется минимальное время.

4. Расчет показателей ремонтопригодности с учетом конструктивной структуры объекта

Формально при расчетах ПН следует выбирать такое множество E_o^*, при котором будет обеспечиваться минимум среднего времени восстановления объекта:

$$T_в(E_o^*) = \min_{E_o \in \{E_o\}} T_в(E_o). \qquad (8)$$

Существование минимума в (8) подтверждается обширным опытом эксплуатации конкретных образцов сложных технических объектов. При иерархической конструктивной структуре объекта практически всегда разработчиком предусматриваются легкосъемные конструктивные элементы, которые относятся к «среднему» конструктивному уровню (это так называемые типовые элементы замены, сокращенно – ТЭЗы). Преимущественная замена в процессе эксплуатации ТЭЗов вполне объясняет существование минимума в (8). На рис. 4 приведены качественные графики зависимости показателей T_o и $T_в$ от номера конструктивного уровня восстанавливаемых элементов *u*.

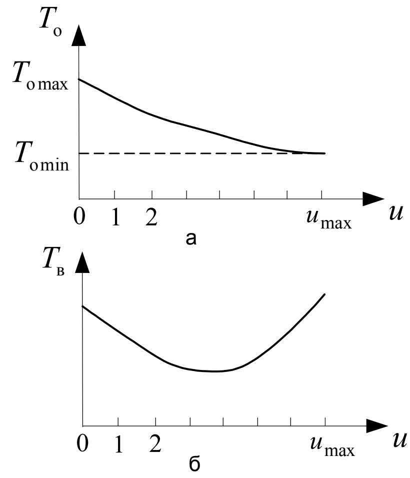


Рис. 4. Общий характер зависимости показателей надежности объекта от конструктивного уровня заменяемых элементов

Значения ПН при $u = 0$ соответствуют вырожденному случаю, когда при каждом отказе производится замена объекта в целом. При заменах более мелких конструктивных единиц (при $u > 0$) величина T_o в среднем монотонно уменьшается в соответствии с утверждением (7). При $u = u_{max}$ при каждом отказе заменяются только отказывающие простые элементы. В этом случае средняя наработка на отказ имеет наименьшее значение $T_{o\min}$. Очевидно, что каждому значению *u* соответствует некоторое подмножество близких по количеству элементов множеств E_o, поэтому графики на рис. 4 не являются однозначными, а отображают лишь тенденции соответствующих зависимостей.

Точное решение задачи (8) (задачи определения E_o^*) вполне возможно путем полного перебора множеств из $\{E_o\}$, однако, очевидно, что это весьма громоздкая процедура.

На практике вряд ли когда-либо потребуется точное определение множества E_o^*. Приближенно множество E_o^* можно сформировать путем выполнения следующего алгоритма [6]:

1) создать пустое множество E_o ($E_o := \varnothing$);

2) для всех простых элементов $e_m \in E_o^{пр}$ построить пути $P(e_m)$, соединяющие соответствующие им висячие вершины дерева *G* с корневой вершиной e^0;

3) для каждого пути $P(e_m)$ найти элемент $e_i \in P(e_m)$, для которого время восстановления $\tau_{вi}$ имеет минимальное значение:

$$e_i : \tau_{вi} = \min_{e_j \in P(e_m)} \tau_{вj},$$

и включить найденный элемент e_i в множество E_o ($E_o := E_o \cup \{e_i\}$);

4) из полученного множества E_o удалить повторяющиеся элементы.

Очевидно, что полученное в результате выполнения данного алгоритма множество E_o будет *полным* и в общем случае *избыточным*. Для устранения избыточности необходимо в множестве E_o найти группы элементов, принадлежащих одному и тому же пути $P(e_m)$, и удалить из них избыточные элементы. В каждой такой группе оставить по одному элементу, имеющему наибольший конструктивный уровень (наименьшее значение *u*).

В результате будет получено множество E_o, которое можно принять приближенно в качестве множества E_o^*. Использование множества E_o^* при расчетах по формулам (1) и (2) обеспечит наибольшую адекватность результатов.

Выводы

В статье произведен анализ влияния параметров конструктивной структуры сложного восстанавливаемого объекта на расчетные значения его показателей надежности. Показано, что такое влияние существует только в том случае, если при расчетах мы учитываем факторы износа и старения элементов объекта (если в качестве модели отказов элементов используется какое-либо из распределений вероятности отказов, имеющее возрастающую функцию интенсивности). Это влияние проявляется с тем большей степенью, чем более интенсивными являются процессы износа и старения.

Если при расчетах надежности факторы износа и старения не учитываются (в качестве модели отказов элементов используется экспоненциальное распределение), параметры конструктивной структуры объекта никак не влияют на расчетные значения показателей надежности.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. С 01.07.1990.

2. Половко А.М. Основы теории надежности. 2-ое изд., перераб. и доп. / А.М. Половко, С.В. Гуров – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

3. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р. Барлоу, Ф. Прошан. – М.: Наука, 1984. – 328 с.

4. Стрельников В.П. Новая технология исследования надежности машин и аппаратуры / В.П. Стрельников // Математические машины и системы. – К.: 2007. – № 3. – С. 227 – 238.

5. Розен В.В. Цель – оптимальность – решение (математические модели принятия оптимальных решений) / В.В. Розен. – М.: Радио и связь, 0982. – 168 с.

6. Имитационное статистическое моделирование процессов технического обслуживания и ремонта сложных объектов РЭТ: модели и оптимизация. [монография] / С.В.Ленков, В.О. Браун, В.А. Осыпа и др.; под ред. С.В. Ленкова. – Николаев: Сент-Гросс, 2013. – 244 с.

Поступила в редколлегию 21.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Х.В. Раковский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПРО ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНОЇ СТРУКТУРИ ВІДНОВЛЮВАНОГО ОБ'ЄКТУ НА ЙОГО ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ

С.В. Лєнков, С.О. Пашков, В.О. Осипа, В.М. Цицарєв

У статті будується математична модель, що встановлює залежність показників надійності відновлюваного технічного об'єкту від параметрів його конструктивної структури. Конструктивна структура об'єкту передбачається ієрархічна. Показано, що параметри конструктивної структури помітно впливають на показники надійності об'єкту лише в тому випадку, якщо розрахунок надійності виробляється з врахуванням процесів зносу і старіння елементів.

***Ключові слова**: математична модель, параметри конструктивної структури, розрахунок надійності, процес зносу.*

ABOUT INFLUENCE OF STRUCTURE OF REFURBISHABLE OBJECT ON HIS RELIABILITY INDEXES

S.V. Lenkov, S.O. Pashkov, V.O. Osypa, V.M. Cycarev

A mathematical model, setting dependence of indexes of reliability of refurbishable technical object on the parameters of his structural structure, is built in the article. The structure of object is assumed hierarchical. It is rotined that the parameters of structural structure notedly influence on reliability of object indexes only in case that the calculation of reliability is produced taking into account the processes of wear and senescence of elements.

***Keywords**: mathematical model, parameters of structural structure, calculation of reliability, processes of wear.*