

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОГО ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ОБЪЕКТА БЕЗ УЧЕТА ЕГО СТРУКТУРЫ

И.В. Толлок

Департамент военного образования и науки Министерства обороны Украины,
Воздушнофлотский пр-т 28, 03049, г. Киев, Украина; e-mail: tolok@ukr.net

В статье приведен анализ особенности технического обслуживания сложного восстанавливаемого объекта без учета его структуры и разработана соответствующая математическая модель.

Ключевые слова: математическая модель, техническое обслуживание, сложный объект.

Введение и постановка задачи

Сложные восстанавливаемые изделия и системы эксплуатируются в различных отраслях и сферах деятельности. Это бытовые приборы, компьютеры, автомобили, производственные линии, системы связи, электростанции и т.п. Эти объекты состоят из отдельных агрегатов, устройств, подсистем, отдельных компонентов, номенклатура и количество которых насчитывает сотни, тысячи, иногда миллионы разнообразных составляющих, и поэтому структуру системы по классическим понятиям не учитывать не возможно.

Обеспечение надежности этих объектов – очень важная и сложная задача, которая решается как при проектировании, так и при эксплуатации путем планирования и проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Контроль надежности, а также стратегия и тактика ТОиР проводится с учетом ряда факторов, в том числе, надежностных показателей всех составляющих компонентов объекта в их взаимосвязи.

Вместе с тем бывают случаи, когда достаточная информация о свойствах (надежности) безотказности отдельных элементов объекта отсутствует. Кроме того, конструктивная структура объекта бывает такой, что при эксплуатации нет доступа к отдельным ее элементам, необходимым для замены или технического обслуживания (ТО). При решении задачи оценки надежности объекта и планирования ТО необходимо рассматривать объект без учета его структуры. Это характерно для элементов объекта, структура которых в целом известна, но при эксплуатации нет возможности менять (восстанавливать) отдельные его составляющие, тогда при отказе составная часть меняется в целом. Кроме того, сам объект может входить в состав какой-либо системы и рассматриваться как элемент, внутренняя структура которого не важна.

В таком случае основной информацией о свойствах надежности объекта (элемента) является функция распределения наработки на отказ $F(t)$. Даже если аналитическое представление функции $F(t)$ отсутствует, а сама функция $F(t)$ задана гистограммой. Для нижних уровней комплектующих элементов: метизы, пружины, прокладки, трубки, резисторы, микросхемы, микропроцессоры и т.п. вид функции $F(t)$

может быть задан на основании данных, полученных при априорных исследованиях и испытаниях на надежность. Для элементов более высоких конструктивных уровней, например, для блоков, узлов, агрегатов, и для всего объекта аналитическое выражение для функции может быть задано также на основании данных, полученных на испытаниях. Вместе с тем, для объектов высших конструктивных уровней и для объекта в целом получить аналитические модели очень сложно.

В данной статье рассматривается имитационная статистическая модель, пригодная для применения, когда структура сложного объекта не может быть учтена. С помощью этой модели можно получить оценки основных показателей надежности: средняя наработка на отказ, коэффициент готовности, коэффициент технического использования и т.п. [1]. Рассматриваются только периодические стратегии ТО по ресурсу [2], хотя нет никаких ограничений на возможность применения модели и в случае других стратегий.

Анализ процесса технического обслуживания

Практически все сложные восстанавливаемые объекты содержат значительное количество механических, электромеханических, электронных, гидравлических и других элементов. Известно, что механизмы процессов изнашивания и старения для разных типов элементов бывают различными. Для микроэлектронных изделий типичны такие процессы: скопления дефектов и кристаллических дислокаций, диффузионные процессы в объеме и на поверхностях материалов, сорбционные и электролитические процессы и т.п. [3, 4]. Для механических элементов наиболее характерными причинами отказов и старения является усталость металлов, микротрещины, коррозия, деструкция керамических, резиновых и полимерных материалов и т.п. Все эти деградационные процессы имеют свои внутренние параметры, которые, как правило, хорошо изучены и учитываются разработчиками. Большая часть из них измеряется (выявляется) только при специальных лабораторных исследованиях. При проектировании таких объектов всегда ищутся какие-либо вторичные параметры, техническое состояние которых можно контролировать.

При этом определяются закономерности этих внутренних параметров, что определяет выбор модели отказов.

Модель отказов – это математическая модель в виде функции распределения наработки на отказ [5]. Принято различать «постепенные» и «внезапные» отказы [4]. Невзирая на условность такой классификации, для потребителя отказы всегда возникают внезапно. Понятие «постепенный отказ» часто используется, когда необходимо подчеркнуть, что причиной отказа являются процессы изнашивания и старения. Процесс деградации элемента описывается некоторым определяющим параметром $x(t)$, в результате влияния внешних факторов и внутренних физико-химических процессов значения определяющего параметра $x(t)$ в процессе эксплуатации ухудшается и в некоторый момент времени достигает предельного значения, в этот момент времени и фиксируется отказ. Такая картина механизма отказов является упрощенной, но в ней отображена главная гипотеза, что отказ – это событие, порождаемое выходом определяющего параметра за пределы допустимых норм.

Характерной чертой постепенных (деградационных) отказов является то, что для них функция интенсивности отказов $\lambda(t)$ является растущей функцией времени:

$$\lambda(t) = f(t)/(1 - F(t)),$$

где $F(t)$ – функция распределения наработки на отказ.

Законы распределения наработки постепенных отказов часто называют распределением растущих функций интенсивности [3, 5]. Для элементов электротехники и радиоэлектроники наиболее адекватной моделью отказов являются диффузионное распределение.

Законом распределения, для которого $\lambda(t) = \lambda = const$, является экспоненциальное распределение, которое, по сути, является моделью «внезапных» отказов, т.е. отказами нестареющих элементов. Естественно то, что нестареющих элементов в природе не существуют, и потому применение модели экспоненциального распределения допустимо, лишь когда нужно получить грубые оценки показателей надежности или в случаях очень медленного старения.

ТО в соответствии с [1, 6] – это комплекс операций по поддержке работоспособности или исправности объекта при использовании его по назначению. Его сущность заключается в частичном или полном возобновлении объекта. Возобновление элемента – это частичное или полное возобновление его ресурса. Содержание операций ТО может быть разным в зависимости от типов и конструкции элементов. Если элемент – это сложный функциональный узел, состояние которого характеризуется одним или несколькими техническими параметрами, то операция ТО, включает две составляющие:

- измерение значения параметра,
- установку номинального его значения.

Установка номинального значения параметра является компенсацией деградационных изменений. Она может производиться регулировкой или путем частичной замены комплектующих элементов. Иногда в качестве заменяемых элементов могут быть масла или другие технические жидкости. Иногда элементы вообще не имеют регулируемых параметров и восстановление их ресурса возможно только путем его замены на новый.

Для определения степени восстановления ресурса объекта при ТО принят коэффициент возобновления ресурса k_{wr} . При полной замене объекта $k_{wr} = 1$. Если операции ТО заключаются в регулировке и (или) частичной замене составных частей, то $k_{wr} < 1$. Для точного определения коэффициента k_{wr} необходимы длительные испытания, стоимость которых может превышать стоимость полезного эффекта. С помощью коэффициента k_{wr} можно учитывать частичное возобновление ресурса при ТО. Для моделирования процессов ТО достаточно задавать приближенное значение k_{wr} , назначаемое экспертом.

В упрощенном виде процесс восстановления ресурса объекта представлен в таком виде. При полном восстановлении объекта ($k_{wr} = 1$) функция плотности вероятности наработки на отказ смещается «вправо» на время $t_{то}$. После проведения ТО ожидаемое среднее время использования ресурса объекта определяется выражениями:

$$t_{то} + T_{cp} \text{ при } k_{wr} = 1, \quad (1)$$

$$t_{то} + T_{cp} k_{wr} \text{ при } k_{wr} < 1. \quad (2)$$

Математическая модель технического объекта без учета его структуры

Процесс ТО объекта без учета его структуры можно описать графом состояний и переходов (рис. 1).

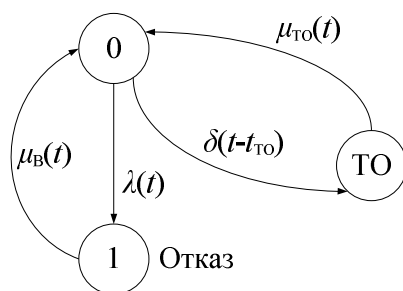


Рис.1. Граф состояний переходов процесса ТО объекта без учета его структуры

На графе состояние 0 – работоспособное состояние, состояние 1 – неработоспособное состояние т.е. объект восстанавливается. Переходы между состояниями происходят в случайные моменты времени с интенсивностями, которые имеют такие обозначения:

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов;

$\mu_{\text{в}}(t)$ – интенсивность восстановления;

$\mu_{\text{то}}(t)$ – интенсивность перехода от состояния ТО в состояние 0;

$\delta(t-t_{\text{то}})$ – интенсивность переходов в состояние ТО, которая представлена с помощью δ -функции:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & \text{при } x = 0; \\ 0, & \text{при } x \neq 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1. \quad (4)$$

Затем имитируются детерминированные переходы в состояние ТО в неслучайные моменты времени $t_{\text{то}}$ с использованием δ -функции $\delta(t-t_{\text{то}})$.

Этот граф состояний и переходов определяет случайный процесс ТО и ТОиР объекта. На основании этого графа по известным правилам [7] построим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -[\lambda(t) + \delta(t-t_{\text{то}})]P_0(t) + \mu_{\text{в}}(t)P_1(t) + \mu_{\text{то}}(t)P_{\text{то}}(t); \\ P'_1(t) = \lambda(t)P_0(t) - \mu_{\text{в}}(t)P_1(t); \\ P'_{\text{то}}(t) = \delta(t-t_{\text{то}})P_0(t) - \mu_{\text{то}}(t)P_{\text{то}}(t); \\ P_0(t) + P_1(t) + P_{\text{то}}(t) = 1; \end{cases} \quad (5)$$

где $P_0(t)$, $P_1(t)$ и $P_{\text{то}}(t)$ – это вероятности того, что в момент времени t объект находится соответственно в состояниях 0, 1 и ТО.

Система уравнений (5) практически и является математической моделью процесса ТО объекта. Следует отметить, что решение этой системы дифференциальных уравнений несколько затруднено, поскольку интенсивность $\lambda(t)$ является функцией времени и ее вид не всегда известен. То же касается функций $\mu_{\text{в}}(t)$ и $\mu_{\text{то}}(t)$, однако их влияние на окончательное решение не очень важно, поскольку среднее время восстановления и средняя длительность ТО на порядки меньше, чем средняя наработка на отказ.

В данной статье предлагается использовать имитационную статистическую модель и с ее помощью получить оценки показателей надежности объекта с учетом проведения ТО. Задав в качестве исходных данных для модели информацию об объекте, состоящего из единственного элемента, получим приближенное решение системы уравнений (5). Как результат моделирования получается функция параметра потока отказов объекта $\Omega(t)$ на заданном интервале времени эксплуатации. Функция $\Omega(t)$ связана с вероятностью $P_1(t)$, входящей в (5), соотношением

$$\Omega(t) \cong \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (6)$$

где $P_1(t, t + \Delta t)$ – вероятность того, что объект в течение интервала времени $(t, t + \Delta t)$ находится в состоянии отказа (в состоянии 1).

Это позволяет констатировать, что $\Omega(t) dt \cong P_1(t)$, получаемая с помощью представления информации по автомобильной технике [8] и модели, построенной для радиоэлектронных объектов [9], функция $\Omega(t)$ удовлетворяет системе уравнений (5).

Средняя наработка на отказ объекта по функции $\Omega(t)$ [7] определяется следующим образом:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\int_0^{T_E} \Omega(t) dt}, \quad (7)$$

где \bar{T}_0 – оценка средней наработки на отказ объекта на интервале эксплуатации $(0, T_E)$; T_E – заданный период эксплуатации.

Оценка \bar{T}_0 в этом случае получается с учетом проведения ТО, поскольку используется функция параметра потока отказов $\Omega(t)$.

Выводы

Получена математическая модель технического обслуживания сложного восстанавливаемого объекта без учета его структуры, которая адекватно отображает физическое содержание этого процесса и подтверждает возможность применения имитационной статистической модели для исследования процессов ТОиР.

Список литературы

1. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Введ. 01.01.1996. – 96 с.
2. Барзилович, Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
3. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
4. Зубарев, В.В. Вплив дефектів функціональних матеріалів на надійність електроніки: Монографія / В.В. Зубарев, С.В. Ленков, В.А. Мокрицький, Д.О. Перегудов. – Одеса: Друк, 2003. – 454 с.
5. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.1999. – 98 с.
6. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – Введ. 01.01.1980. – 27 с.

7. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
8. Толок, И.В. Построение информационной базы системы технического обслуживания и ремонта автомобильной техники / И.В. Толок // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2008. – Вип. 3(18). – С.146 – 148.
9. Браун, В.О. Моделирование процессов технического обслуживания сложных восстанавливаемых объектов радиоэлектронной техники / В.О. Браун, К.Ф. Боряк, О.Б. Лантвойт, В.Н. Цыцарев. // Вісник інженерної академії України. – 2008. – №2. – С. 8-14.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНОГО ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ БЕЗ УРАХУВАННЯ ЙОГО СТРУКТУРИ

І.В. Толок

Департамент військової освіти та науки Міністерства оборони України,
Повітрофлотський пр-т 28, 03049, м. Київ, Україна; e-mail: tolok@ukr.net

У статті приведений аналіз особливості технічного обслуговування складного відновлюваного об'єкту без урахування його структури і розроблена його відповідна математична модель.

Ключові слова: математична модель, технічне обслуговування, складний об'єкт.

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNICAL MAINTENANCE OF DIFFICULT REFURBISHABLE OBJECT WITHOUT ACCOUNT OF HIS STRUCTURE

I. Tolok

Department of Military Education and Science of the Ministry of Defence of Ukraine,
28 Povitroflotcky Ave, Kyiv, 03049, Ukraine; e-mail: tolok@ukr.net

To the article the analysis of feature of technical maintenance of difficult refurbishable object is driven without the account of his structure and a corresponding mathematical model is worked out.

Keywords: mathematical model, technical service, difficult object.