

СИСТЕМИ ТА МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 681.3(07)

С.В. Ленков,

доктор технических наук, профессор,

В.О. Браун,

кандидат технических наук, доцент,

С.А. Пашков,

кандидат военных наук, доцент,

В.Н. Цыцарев,

кандидат технических наук, доцент

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ: ПО РЕСУРСУ И ПО СОСТОЯНИЮ

Предложена модель смешанного технического обслуживания (ТО) сложных объектов РЭТ: ТО по ресурсу и ТО по состоянию. Используется ранее разработанная имитационная статистическая модель процесса ТО и ремонта объекта РЭТ. Рассмотрено содержание процесса смешанного ТО и особенности его реализации в модели. Моделирование ТО по состоянию основывается на использовании вероятностно-физической модели DN-распределения, в которой определена связь между вероятностными характеристиками физического определяющего параметра и вероятностными характеристиками случайной наработки до отказа элемента. Моделирование ТО по ресурсу осуществляется как простая замена элемента при выработке установленного для него значения ресурса.

Приводится пример моделирования, результатами которого качественно подтверждается адекватность модели и правильность реализации ее алгоритмов.

Ключевые слова: *техническое обслуживание, объекты радиоэлектронной техники, техническое состояние элементов.*

Запропонована модель змішаного технічного обслуговування (ТО) складних об'єктів РЕТ: ТО по ресурсу і ТЕ за станом. Використовується раніше розроблена імітаційна статистична модель процесу ТЕ і ремонту об'єкта РЕТ. Розглянутий зміст процесу змішаного ТЕ і особливості його реалізації в моделі. Моделювання ТЕ по стану ґрунтується на використанні імовірнісно-фізичної моделі DN-розподілу, в якій визначений зв'язок між імовірнісними характеристиками випадкового напрацювання до відмови елемента. Моделювання ТО по ресурсу здійснюється як проста заміна елемента при відпрацюванні встановленого для нього значення ресурсу.

Наводиться приклад моделювання, результатами якого якісно підтверджується адекватність моделі і вірність реалізації її алгоритмів.

Ключові слова: *технічне обслуговування, об'єкти радіоелектронної техніки, технічний стан елементів.*

The model of the mixed technical maintenance of slozh-nykh objects of RET is offered: On a resource and THAT on the state. Used before raz-rabotannaya simulation statistical model of process THAT and repair of object of RET]. Maintenance of process is considered mixed THAT and osobenno-sti of his realization in a model. Design THAT on the state is based on the use of probabilistic-physical model of dn-distributing, in which connection is certain between probabilistic descriptions of physical determining parameter and probabilistic descriptions of casual work completely of element. Design THAT on a resource is carried out as simple replacement of element at making of the value of resource set for him.

An example of design the results of which are confirm model adequacy and rightness of realization of its algo-rhythms high-quality is made.

Keywords: *technical service, objects of radio electronic technique, technical state of elements.*

Введение

Для сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ) важным средством поддержания уровня их надежности в процессе эксплуатации является техническое обслуживание (ТО). Благодаря ТО, которое проводится в периоды времени, когда объект РЭТ непосредственно по назначению не применяется, предотвращаются отказы наименее надежных элементов путем их превентивной замены. Эффективное ТО возможно только в том случае, если есть информация о фактическом техническом состоянии (ТС) элементов объекта. Для ее получения еще на этапе проектирования в конструкцию объекта вводятся дополнительные элементы и средства, обеспечивающие контроль и диагностику объекта. Очевидно, что это требует дополнительных экономических затрат, которые могут быть весьма существенными. Поэтому при проектировании объекта производится надежностный анализ структуры объекта с целью выявления элементов, которые в процессе эксплуатации будут целесообразно (или даже необходимо) подвергать ТО. При таком анализе важно найти определяющие параметры, контролируя которые можно будет определять фактическое ТС элементов в процессе эксплуатации.

В реальности оказывается, что лишь для небольшой части элементов имеется возможность осуществлять контроль их ТС сравнительно простыми техническими средствами, для большинства же элементов, которые было бы желательно подвергать в процессе эксплуатации обслуживанию (обновлению), требуются дорогостоящие дополнительные изменения в конструкции, а в некоторых случаях – еще и дополнительные исследования. Поэтому разработчик вынужден закладывать в конструкцию объекта возможности проведения ТО по состоянию (ТОС) лишь для небольшой части элементов, а для всех остальных элементов, отнесенных к недостаточно надежным, ограничиться ТО по ресурсу (ТОР).

В данной статье рассматривается процесс смешанного ТО, при котором часть элементов объекта обслуживается по состоянию (это элементы, для которых имеются измеряемые определяющие параметры), а другая часть элементов (для которых измеряемые определяющие параметры отсутствуют) обслуживается по ресурсу. Моделирование этого процесса осуществляется в рамках разработанной нами ранее имитационной статистической модели (ИСМ) [1], в которую введены необходимые для этого изменения в алгоритмах. Результатом моделирования являются оценки показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта РЭТ при заданных параметрах смешанного ТО.

Содержание моделируемого процесса

Структуру моделируемого процесса можно представить графом состояний и переходов, представленным на рис. 1. Основную часть времени эксплуатации объект РЭТ находится в состоянии ожидания применения (состояние 0) или непосредственного применения по назначению (состояние 1). Соотношение долей времени пребывания в этих состояниях может быть различным в зависимости от типа и предназначения объекта. Например, если объектом РЭТ является радиолокационная станция дежурного режима, то подавляющая часть времени ее эксплуатации приходится на состояние 1. Если в качестве объекта РЭТ рассматривается зенитно-ракетный комплекс ПВО, то очевидно, что большая часть времени его эксплуатации приходится на подготовку и ожидание к непосредственному применению (состояние 0).

В состоянии 0 аппаратура объекта может быть включена или выключена (обесточена). В состояниях 0 и 1 объект считается работоспособным. Предполагается, что в состояниях 0 и 1 осуществляется непрерывный контроль работоспособности (КР) объекта. В результате КР обнаруживаются отказы объекта. Отказ объекта (переход в состояние 2) может происходить как в состоянии 0, так и в состоянии 1. Для нас главное различие между состояниями 0 и 1 состоит только в том, что при отказе в состоянии 1 система (в которой используется рассматриваемый объект) несет большие потери, которые являются существенно большими по сравнению с потерями в случае отказа в состоянии 0.

Контроль технического состояния (КТС) объекта осуществляется с периодичностью T_k . При выполнении КТС объект РЭТ переходит в состояние 3. При КТС проверяется не только работоспособность объекта (это осуществляется при КР), но и ТС всех элементов, для которых предусмотрено ТОС. Подмножество таких элементов объекта обозначим $E_{\text{ТОС}}$. Предполагается, что для всех элементов $e_i \in E_{\text{ТОС}}$ существует измеряемый определяющий параметр, нормированное значение

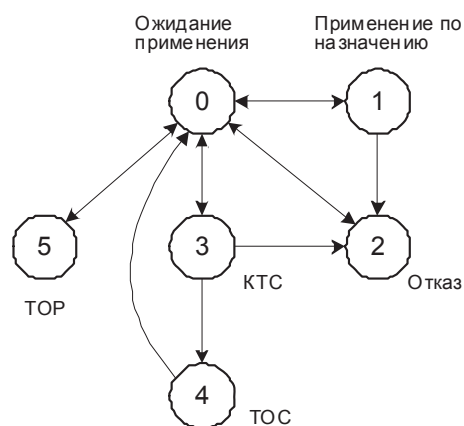


Рис. 1. Граф состояний и переходов моделируемого процесса.

котрого будемо позначати $u_i(t)$ ($u_i(t) \in [0, 1]$). Якщо в момент часу КТС t значення $u_i(t)$ досягло або перевищило деяке задане порогове значення $u_{\text{то}1}$, проводиться ТО (або заміна) елемента e_i . Величину $u_{\text{то}1}$ будемо називати *рівнем ТО* i -го елемента. Якщо для хоча б одного з елементів $e_i \in E_{\text{то}1}$ викониться умова $u_i \geq u_{\text{то}1}$, об'єкт переходить в стан 4. Після завершення КТС або ТОС об'єкт повертається в стан 0 (див. рис. 1). Очевидно, що поломка об'єкта може бути виявлена не тільки при КР (перехід $0 \rightarrow 2$), але і в результаті КТС (перехід $3 \rightarrow 2$). В стані 2 проводиться відновлення працездатності (поточний ремонт) об'єкта. Припускається, що після відновлення об'єкт переходить в стан 0.

В процесі експлуатації об'єкта наряду з ТОС проводиться також ТОР з періодичністю $T_{\text{то}}^1$. На рис. 1 проведення ТОР відповідає переходу в стан 5. Величини $T_{\text{то}}$ і $T_{\text{к}}$ можуть бути кратними, в цьому випадку КТС і ТОР можуть накладатися по часу. При проведенні ТОР проводиться ТО (заміна) всіх елементів, включених в множину $E_{\text{то}2}$ – множина елементів, обслуговуваних по ресурсу. Множини $E_{\text{то}1}$ і $E_{\text{то}2}$ зазвичай не перетинаються.

Для моделювання поломок елементів об'єкта в ИСМ [1] використовується *DN*-розподіл, яке є найбільш адекватною моделлю поломок для радіоелектронних і електро-механічних елементів [2]. Важливою особливістю моделі *DN*-розподілу є те, що з її допомогою встановлюється зв'язок між характеристиками процесу деградації визначаючого параметра, яким характеризується ТС елемента, і ймовірнісними характеристиками випадкової наработки до поломки цього ж елемента. Суть цього зв'язку пояснюється на рис. 2. В випадку *DN*-розподілу цей зв'язок є гранично простим [2]:

$$\mu_i = 1/a_{ui}; \quad v_i = v_{ui}, \quad (1)$$

де μ_i і v_i – параметри *DN*-розподілу (μ_i – середня наработка до поломки і v_i – коефіцієнт варіації випадкової наработки до поломки i -го елемента); a_{ui} – середня швидкість процесу деградації (старіння) визначаючого параметра $u_i(t)$; v_{ui} – коефіцієнт варіації параметра $u_i(t)$.

Ітак, отримується, що параметри змішаного ТО є окремими для ТОС і ТОР, позначимо ці параметри відповідно $P_{\text{тос}}$ і $P_{\text{тор}}$:

¹ Періодичність ТОР може визначатися як в одиницях часу, так і в одиницях наработки.

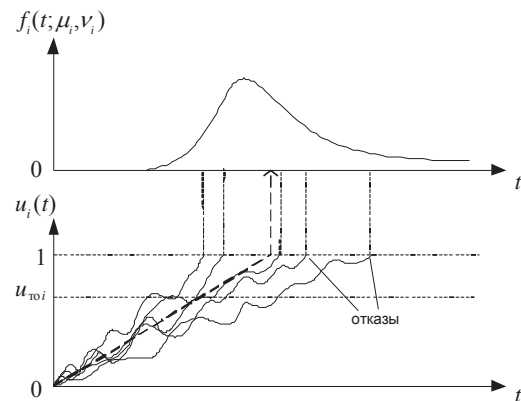


Рис. 2. Процес деградації визначаючого параметра.

$$P_{\text{тос}} = \{E_{\text{то1}}, U_{\text{то}}, T_{\text{к}}\}; \quad (2)$$

$$P_{\text{тор}} = \{E_{\text{то2}}, T_{\text{то}}\}, \quad (3)$$

где $U_{\text{то}} = \{u_{\text{то}i}; i = \overline{1, |E_{\text{то1}}|}\}$ – вектор уровней ТО $u_{\text{то}i}$, которые в общем случае различны для различных элементов $e_i \in E_{\text{то1}}$. Все остальные обозначения в (2) и (3) уже были введены ранее.

С помощью ИСМ [1] имеется возможность получать прогнозные оценки основных показателей надежности (ПН) и стоимости эксплуатации (СЭ), которые при смешанной стратегии ТО зависят совместно от параметров $P_{\text{тос}}$ и $P_{\text{тор}}$. Цель данной статьи – продемонстрировать и проанализировать эту зависимость.

Выходные показатели и исходные данные модели

В качестве исследуемых показателей выберем среднюю наработку на отказ T_0 (показатель безотказности) и удельную стоимость эксплуатации объекта c_3 . Для правильной интерпретации результатов моделирования запишем выражения, в соответствии с которыми в ИСМ вычисляются оценки показателей T_0 и c_3 . Одновременно при этом введем обозначения для переменных, представляющих исходные данные.

Величина T_0 определяется по формуле

$$T_0 = T_3 / \bar{n}_{\text{отк}}, \quad (4)$$

где T_3 – заданный период эксплуатации объекта РЭТ; $\bar{n}_{\text{отк}}$ – среднее число отказов системы в течение времени T_3 .

Величину c_3 будем определять как сумму следующих трех составляющих:

$$c_3 = c_{\text{тр}} + c_{\text{тос}} + c_{\text{тор}}, \quad (5)$$

где $c_{\text{тр}}$, $c_{\text{тос}}$ и $c_{\text{тор}}$ – составляющие затрат стоимости, приходящиеся соответственно на текущий ремонт (восстановление работоспособности объекта), ТОС и ТОР объекта².

Запишем расчетные соотношения для этих составляющих:

$$c_{\text{тр}} = \frac{1}{T_3} \left(\sum_i^N (C_{0i} + C_{\text{зам}i}) \bar{n}_{\text{отк}i} \right); \quad (6)$$

$$c_{\text{тос}} = \frac{1}{T_{\text{к}}} \left(C_{\text{ктс}} + \sum_i^{N_{\text{то1}}} (C_{\text{то}i} + C_{\text{зам}i} P_{\text{зам}i}) \bar{n}_{\text{тос}i}(u_{\text{то}i}) \right); \quad (7)$$

² Составляющие стоимости, связанные с затратами электроэнергии, зарплатой обслуживающего персонала, не учитываются.

$$c_{\text{top}} = \frac{1}{T_{\text{TO}}} \left(\sum_i^{N_{\text{TO2}}} (C_{\text{TO}i} + C_{\text{зам}i} p_{\text{зам}i}) \right), \quad (8)$$

где N – число элементов, включенных в структурную схему надежности объекта; N_{TO1} и N_{TO2} – число элементов, обслуживаемых при ТОС и ТОР соответственно ($N_{\text{TO1}} = |E_{\text{TO1}}|$, $N_{\text{TO2}} = |E_{\text{TO2}}|$); C_{0i} – стоимость i -го элемента ($i = \overline{1, N}$); $C_{\text{зам}i}$ и $C_{\text{TO}i}$ – стоимости операций замены и ТО i -го элемента; $p_{\text{зам}i}$ – вероятность того, что при ТО потребуется полная замена элемента; $\bar{n}_{\text{отк}i}$ – среднее число отказов i -го элемента за время $T_{\text{э}}$ ($\sum_i \bar{n}_{\text{отк}i} = \bar{n}_{\text{отк}}$); $\bar{n}_{\text{тос}i}(u_{\text{TO}i})$ – среднее количество ТОС i -го элемента, выполняемых в течение времени $T_{\text{э}}$; $C_{\text{ктс}}$ – стоимость операции контроля ТС объекта.

Величины $\bar{n}_{\text{отк}i}$ и $\bar{n}_{\text{тос}i}(u_{\text{TO}i})$ в (6) и (7) в явном виде не вычисляются, неявно формируются в процессе моделирования, все подробности алгоритмов моделирования можно найти в [1]. Остальные переменные, используемые в выражениях (6)–(8), вводятся в модель как исходные данные.

Пример моделирования

Для примера возьмем тестовый объект РЭТ, состоящий из $N=10$ однотипных элементов, имеющих одинаковый уровень надежности. Среднюю наработку до отказа элементов зададим одинаковой и равной $T_{\text{ср}i} = \mu_i = 10000$ ч. Коэффициент вариации наработки до отказа элементов равен $\nu_i = 0,8$. Напомним, что в ИСМ [1] в качестве модели отказов используется DN -распределение. В рассматриваемом примере принимаем, что все элементы тестового объекта соединены в смысле надежности последовательно. Стоимостные характеристики элементов так же зададим одинаковыми: $C_{0i} = 10$ у.е.; $C_{\text{зам}i} = C_{\text{TO}i} = 1$ у.е.; $p_{\text{зам}i} = 0$. Такой простой пример существенно облегчает интерпретацию результатов моделирования.

Моделирование будем производить для продолжительности эксплуатации $T_{\text{э}} = 20$ лет. Число реализаций моделирования зададим равным 1000. Все детали подготовки исходных данных для программы ИСМ изложены в [1].

Вначале произведем расчеты для случая, если никакое ТО не проводится. В этом случае получаются следующие результаты:

$$T_0 = 1010 \text{ ч}; c_{\text{э}} = c_{\text{тр}} = 0,07029 \text{ у.е./ч}; \varepsilon = 0,036.$$

Получаемые в результате моделирования значения показателей являются статистическими оценками, точность которых определяется относительной величиной ε (величина ε рассчитывается как половинный 95 %-й доверительный интервал для относительной ошибки оценки средней наработки на отказ T_0).

Моделирование с учетом проведения ТО будем осуществлять для различных стратегий ТО при одном и том же составе обслуживаемых элементов. В качестве потенциально обслуживаемых выберем четыре элемента, например, это элементы с номерами 1, 2, 3 и 4³.

С целью сравнительного исследования различных стратегий ТО для моделирования выберем следующие варианты стратегий:

- ТОС для всех обслуживаемых элементов, то есть стратегия, при которой $E_{то1} = \{1, 2, 3, 4\}$ и $E_{то2} = \emptyset$;
- ТОР для всех обслуживаемых элементов, то есть стратегия, при которой $E_{то1} = \emptyset$ и $E_{то2} = \{1, 2, 3, 4\}$;
- смешанная стратегия ТО-1, при которой $E_{то1} = \{1, 2\}$ и $E_{то2} = \{3, 4\}$; при этой стратегии элементы $\{1, 2\}$ обслуживаются по состоянию, а элементы $\{3, 4\}$ – по ресурсу;
- смешанная стратегия ТО-2, при которой $E_{то1} = \{3, 4\}$ и $E_{то2} = \{1, 2\}$. Очевидно, что стратегии ТО-1 и ТО-2 должны быть равноценными по получаемым показателям, так как все элементы тестового объекта одинаковы.

Для ТОС зададим следующие параметры: $u_{toi} = 0,5$ ($i = 1, 4$) и $T_k = 1500$ ч. Периодичность ТО в случае ТОР $T_{то}$ также зададим равной 1500 ч. Равенство $T_k = T_{то}$ даст нам основание сравнивать получаемые в данном примере показатели при стратегиях ТОС и ТОР. В общем же случае оптимальные значения T_k и $T_{то}$, скорее всего, должны быть различными. Вопросы определения оптимальных значений параметров T_k и $T_{то}$ в статье не рассматриваются.

Все результаты расчетов, полученные в данном примере, сведены в табл. 1.

Таблица 1

ПН и СЭ тестового объекта при различных стратегиях ТО

Стратегия ТО	Показатели, полученные в результате моделирования				
	T_0 , ч	c_3 , у.е./ч	$c_{тр}$, у.е./ч	$c_{то}$, у.е./ч	ε
Без ТО	1010	0,07029	0,07029	-	0,036
ТОС ($E_{то1} = \{1, 2, 3, 4\}; E_{то2} = \emptyset$)	1660	0,04410	0,04276	0,00134	0,037
ТОР ($E_{то1} = \emptyset; E_{то2} = \{1, 2, 3, 4\}$)	1600	0,04766	0,04437	0,00330	0,032
Смешанное ТО-1 ($E_{то1} = \{1, 2\}; E_{то2} = \{3, 4\}$)	1630	0,04652	0,04354	0,00298	0,036
Смешанное ТО-2 ($E_{то1} = \{3, 4\}; E_{то2} = \{1, 2\}$)	1630	0,04653	0,04355	0,00298	0,034

Выводы

Проведение ТО (любого) в данном примере существенно увеличивает уровень безотказности объекта (в $\approx 1,6$ раза). Объясняется это тем, что в рассмотренном

³ Нумерация в данном случае является произвольной, так как все элементы одинаковы.

примере при ТО происходит обновление значительной части элементов (4 из 10). Уменьшение стоимости эксплуатации является следствием уменьшения среднего числа отказов объекта.

Стратегия ТОС (при прочих равных условиях) является более эффективной по сравнению со стратегией ТОР – уровень безотказности возрастает при одновременном уменьшении стоимостных затрат на эксплуатацию объекта. Причина этого проста – при ТОС используется дополнительная информация о фактическом ТС элементов объекта, вследствие чего в среднем сокращается количество “ненужных” (перестраховочных) превентивных замен элементов.

Смешанная стратегия ТО занимает промежуточное состояние по получаемым значениям ПН и СЭ объекта. Это хорошо согласуется с физическим смыслом моделируемых процессов. При смешанных стратегиях ТО-1 и ТО-2 значения ПН и СЭ практически одинаковы, что является следствием одинаковой надежности элементов тестового объекта. Последнее может служить дополнительным подтверждением правильности алгоритмов, реализованных в ИСМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 45 с.

Отримано 12.03.2015.

Рецензент Рибальський О.В., доктор технічних наук, професор