

УДК 681.3(07)

С.В. Ленков, В.Н. Цыцарев, Д.В. Зайцев, Я.Н. Проценко

Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ С РЕЗЕРВИРОВАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В статье приводятся краткие сведения о модели процесса технического обслуживания (ТО) по состоянию объекта радиоэлектронной техники (РЭТ), имеющего в своем составе резервированные элементы. В модели предусмотрено, что резервирование может быть постоянным или замещающим. Моделирование осуществляется методом имитационного статистического моделирования. В качестве результатов моделирования получаются прогнозные оценки показателей надежности объекта РЭТ, в составе которого имеются обслуживаемые резервированные элементы. Приводится простой пример результатов моделирования, на конкретном примере исследуется зависимость показателей надежности объекта от параметров ТО.

Ключевые слова: объект радиоэлектронной техники, показатели надежности, имитационное статистическое моделирование, техническое обслуживание по состоянию.

Введение

Под объектом радиоэлектронной техники (РЭТ) понимается любое техническое устройство, элементами которого являются преимущественно изделия электронной техники (микросхемы, конденсаторы, резисторы, полупроводниковые приборы и т.д.). В составе объекта РЭТ, как правило, имеются также механические, электромеханические, гидравлические или другие не электронные элементы. Типичным примером объекта РЭТ может служить радиолокационная станция.

Надежностная структура объекта РЭТ обычно последовательно-параллельная. Типичный вид структурной схемы надежности (ССН) изображен на рис. 1. ССН, как известно, является одним из самых распространенных способов формализованного представления условия работоспособности объекта [1]. ССН разрабатывается для каждой из функций объекта, если объект РЭТ является многофункциональным.

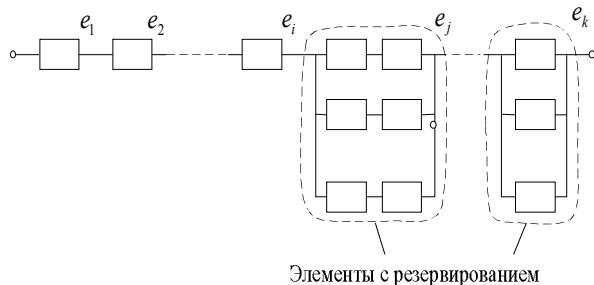


Рис. 1. Структурная схема надежности объекта РЭТ

Для обеспечения требуемого уровня безотказности объекта проводится техническое обслуживание (ТО) [2]. Суть ТО заключается в превентивной замене некоторой части элементов, которые в данный момент еще работоспособны, но с большой вероятностью ожидается, что их техническое состоя-

ние (ТС) близко к состоянию отказа. Если в момент проведения ТО перед тем, как произвести какие-либо профилактические работы выполняются проверки ТС элементов, то такой подход к проведению ТО называют «ТО по состоянию» [3].

На этапе создания объекта РЭТ, когда проектируется система ТО объекта, определяется подмножество элементов $E_{ТО} = \{e_i\}$, подлежащих ТО в процессе эксплуатации, и определяются правила (стратегия), в соответствии с которыми должны выполняться работы по ТО. При ТО по состоянию для каждого элемента $e_i \in E_{ТО}$ задается определяющий параметр u_i , величина которого характеризует ТС данного элемента. В настоящей статье мы рассмотрим вопросы ТО по состоянию только для резервированных элементов. В качестве характеристики ТС резервированного элемента e_i примем величину

$$u_i = n_{гi} / n_i, \quad (1)$$

где $n_{гi}$ – число отказавших элементов в резервированной группе, образующей элемент e_i ; n_i – число всех элементов, входящих в состав резервированной группы e_i . Значение $u_i = 0$ соответствует полностью исправному состоянию, значение $u_i = 1$ – состоянию отказа элемента e_i .

Обозначим $u_{тоi}$ величину, при достижении которой выполняется ТО элемента e_i . Величину $u_{тоi}$ будем называть *уровнем ТО*. Условимся, что при ТО резервированного элемента, то есть при $u_i \geq u_{тоi}$, производится обновление всех, входящих в его состав резервных элементов, и исправных, и отказавших.

Систему ТО объекта РЭТ при использовании принципа ТО по состоянию будем характеризовать следующей совокупностью параметров:

$$P_{\text{ТО}} = \langle E_{\text{ТО}}, U_{\text{ТО}}, T_{\text{К}} \rangle, \quad (2)$$

где $E_{\text{ТО}} = \{e_i\}$ – множество обслуживаемых элементов ($E_{\text{ТО}} \subset E$, E – множество всех элементов, представленных в ССН); $U_{\text{ТО}} = \{u_{\text{ТО}i}\}$ – множество (вектор) значений уровней ТО соответствующих элементов множества $E_{\text{ТО}}$; $T_{\text{К}}$ – периодичность контроля объекта РЭТ.

Процесс ТО по состоянию, проводимый в соответствии с параметрами (2), состоит в следующем. Периодически, в моменты времени $t = k \cdot T_{\text{К}}$ ($k = 1, 2, \dots$) производится контроль ТС объекта, при котором проверяется ТС всех элементов $e_i \in E_{\text{ТО}}$ (измеряются значения u_i). Если оказывается, что $u_i(t) \geq u_{\text{ТО}i}$, выполняется замена (обновление) всех элементов, входящих в состав элемента (резервированной группы) e_i .

Очевидно, что показатели надежности (ПН) объекта РЭТ зависят от параметров $P_{\text{ТО}}$, и знание этой зависимости необходимо как при проектировании объектов РЭТ, так и при разработке нормативных правил их эксплуатации. Основными ПН объектов РЭТ, относящихся к восстанавливаемым объектам, являются: средняя наработка на отказ T_0 , среднее время восстановления $T_{\text{в}}$, коэффициент готовности $K_{\text{г}}$ и коэффициент технического использования $K_{\text{ти}}$ [4]. Для определения зависимости этих показателей от параметров $P_{\text{ТО}}$ вряд ли представляется возможным построить удовлетворительную аналитическую модель, поэтому для определения ПН объекта РЭТ будем использовать метод имитационного статистического моделирования. Воспользуемся ранее разработанной нами имитационной статистической моделью (ИСМ), подробные сведения о которой изложены в [5].

Помимо рассмотрения самой модели ТО, в настоящей статье также ставится задача исследовать влияние параметров ТО $P_{\text{ТО}}$ на показатели T_0 , $T_{\text{в}}$, $K_{\text{г}}$ и $K_{\text{ти}}$ для случая, если ТО по состоянию подвергаются только резервированные элементы и в качестве меры состояния обслуживаемых резервированных элементов используется величина (1).

Расчетные формулы для оценок показателей надежности

Расчетные формулы для определения оценок показателей T_0 , $T_{\text{в}}$, $K_{\text{г}}$ и $K_{\text{ти}}$ общеизвестны, тем не менее, целесообразно их привести здесь для уточнения содержания моделируемого процесса. Формулы следующие:

$$\tilde{T}_0 = t_{0\Sigma} / N_{0\Sigma};$$

$$\tilde{T}_{\text{в}} = t_{\text{в}\Sigma} / N_{0\Sigma}; \quad \tilde{K}_{\text{ти}} = t_{0\Sigma} / (t_{0\Sigma} + t_{\text{в}\Sigma} + t_{\text{ТО}\Sigma});$$

$$\tilde{K}_{\text{г}} = t_{0\Sigma} / (t_{0\Sigma} + t_{\text{в}\Sigma}) = \tilde{T}_0 / (\tilde{T}_0 + \tilde{T}_{\text{в}}); \quad (3)$$

где $N_{0\Sigma}$ – накопленное суммарное число отказов объекта в течение времени моделирования;

$t_{0\Sigma}$, $t_{\text{в}\Sigma}$, $t_{\text{ТО}\Sigma}$ – накопленные значения суммарного времени (наработки) между отказами, суммарного времени пребывания в состояниях восстановления и ТО соответственно.

Знак тильды \sim здесь и далее обозначает статистическую оценку соответствующего показателя. Отдельные составляющие суммарных затрат времени в (3), определяются согласно следующим выражениям.

Суммарное время восстановления $t_{\text{в}\Sigma}$ определяется по формуле:

$$t_{\text{в}\Sigma} = \sum_{i \in E} N_{0i\Sigma} (\tau_{\text{кр}} + \tau_{\text{пн}} + n_i \tau_{\text{зам}i}), \quad (4)$$

где $N_{0i\Sigma}$ – суммарное число отказов элемента e_i ($N_{0\Sigma} = \sum_i N_{0i\Sigma}$); $\tau_{\text{кр}}$ – продолжительность контроля работоспособности объекта; $\tau_{\text{пн}}$ – среднее время поиска неисправного элемента; n_i – число элементов в группе; $\tau_{\text{зам}i}$ – среднее время замены элемента e_i . Если $n_i > 1$, то элемент e_i представляет собой резервированную группу однотипных элементов.

Суммарное время нахождения в состоянии ТО $t_{\text{ТО}\Sigma}$ определяется по формуле:

$$t_{\text{ТО}\Sigma} = N_{\text{ТО}\Sigma} (\tau_{\text{кр}} + \tau_{\text{ктс}} + \bar{\tau}_{\text{ТО}}), \quad (5)$$

где $N_{\text{ТО}\Sigma}$ – накопленное за время моделирования суммарное количество ТО; $\tau_{\text{ктс}}$ – продолжительность контроля технического состояния (измерение определяющего параметра u_i); $\bar{\tau}_{\text{ТО}}$ – средняя продолжительность одного ТО, которая определяется в соответствии с выражением:

$$\bar{\tau}_{\text{ТО}} = \sum_{i \in E_{\text{ТО}}} P_{\text{ТО}i} \sum_j^{n_i} \left([(1 - P_{\text{отк}ij}) \tau_{\text{ТО}ij} (1 - p_{\text{зам}ij}) + \tau_{\text{зам}ij} p_{\text{зам}ij}] + P_{\text{отк}ij} \tau_{\text{зам}ij} \right), \quad (6)$$

где $P_{\text{ТО}i}$ – вероятность того, что элемент e_i будет подвергаться обслуживанию при проведении ТО (Вероятность того, что при контроле в момент времени $t = k \cdot T_{\text{К}}$ выполнится условие $u_i(t) \geq u_{\text{ТО}i}$); $P_{\text{отк}ij}$ – вероятность того, что при ТО элемента e_i входящий в его состав j -й элемент окажется в состоянии отказа ($j = \overline{1, n_i}$). Вероятности $P_{\text{ТО}i}$ и $P_{\text{отк}ij}$ в явном виде не определяются, неявно они формируются в процессе моделирования. Величины $\tau_{\text{ТО}ij}$ и $p_{\text{зам}ij}$, входящие в (6), это соответственно продолжительность операции ТО и вероятность того, что при ТО потребуется замена j -го элемента (j -го элемента, входящего в состав e_i).

Нетрудно видеть, что согласно выражению (6) при ТО элемента, представляющего собой резервированную группу, обновлению подвергаются все элементы, входящие в данную резервированную группу. Если какой-либо из резервных элементов оказывается неисправным, он просто заменяется новым (исправным).

Приведенная совокупность формул устанавливает зависимость интересующих нас ПН от параметров состава, структуры и надежности отдельных элементов объекта РЭТ, и от параметров ТО P_{TO} (2). Реализация этих формул в ИСМ подробно описана в [5]. Далее на простом примере исследуем зависимость, существующую между показателями T_0 , T_B , K_T , $K_{ти}$ и параметрами ТО P_{TO} .

Пример расчетов показателей надежности с учетом ТО резервированных элементов

Для решения поставленной в данной статье задачи воспользуемся простым примером тестового объекта РЭТ, ССН которого показана на рис. 2. Элементы объекта e_1 , e_2 , и e_3 одинаковы, их надежность определяется показателями: средняя наработка до отказа $\mu_1 = 10000$ ч; коэффициент вариации случайной наработки до отказа $\nu_1 = 1$. Элемент e_4 представляет собой резервированную группу, состоящую из n однотипных элементов. Элементы в резервированной группе имеют показатели надежности $\mu_2 = 1000$ ч и $\nu_2 = 1$. Случайная наработка до отказа всех элементов подчинена диффузионному немономонному распределению с соответствующими параметрами μ и ν [6]. Показатели ремонтпригодности (их обозначения определены выше) зададим следующие: $\tau_{замi} = 1$ ч, $\tau_{кТС} = 1$ ч, $\tau_{кр} = 0$, $\tau_{пн} = 0$.

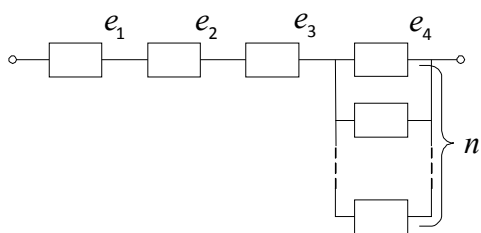


Рис. 2. ССН тестового объекта

Дальнейшие расчеты (с использованием модели [5]) произведем при $n = 2, 3, 4, 5$. Если ТО не проводится, то в результате моделирования мы получим оценки ПН, значения которых представлены в табл. 1. Подчеркнем при этом, что все приводимые ниже оценки являются случайными реализациями, так как получены они в результате моделирования, точность (относительная ошибка) их лежит в пределах $1 \div 5\%$. При $n = 1$, то есть при отсутствии резервирования,

для тестового объекта получаются следующие значения ПН: $\tilde{T}_0 = 768$ ч, $\tilde{T}_B = 1,0$ ч, $\tilde{K}_T = 0,99870$. Далее, для моделирования с учетом ТО зададим в исходных данных¹, что обслуживаемым является единственный элемент e_4 , то есть $E_{TO} = \{e_4\}$. Остальные параметры ТО будем варьировать в некоторых пределах для выяснения их влияния на показатели надежности. Результаты расчетов будем представлять в виде графиков.

Таблица 1

Показатели надежности тестового объекта при отсутствии ТО

| n | Постоянное резервирование | | | Замещающее резервирование | | |
|-------|---------------------------|-------------------|---------------|---------------------------|-------------------|---------------|
| | \tilde{T}_0 , ч | \tilde{T}_B , ч | \tilde{K}_T | \tilde{T}_0 , ч | \tilde{T}_B , ч | \tilde{K}_T |
| n = 2 | 1066 | 1,86 | 0,99825 | 1369 | 1,77 | 0,99871 |
| n = 3 | 1256 | 2,69 | 0,99786 | 1836 | 2,37 | 0,99871 |
| n = 4 | 1397 | 3,51 | 0,99749 | 2201 | 2,83 | 0,99871 |
| n = 5 | 1507 | 4,32 | 0,00713 | 2480 | 3,19 | 0,99871 |

Произведем расчеты при фиксированном значении уровня ТО $u_{TO4} = 0,5$ и при варьировании периодичности контроля T_K в пределах от 1000 до 6000 ч. Все полученные результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 3 (при постоянном резервировании) и рис. 4 (при замещающем резервировании). Пунктирными линиями на графиках показаны уровни значений соответствующих показателей при условии, если ТО не проводится (табл. 1). Анализ полученных графиков позволяет в целом констатировать следующее:

1) благодаря проведению ТО показатели надежности объекта улучшаются по сравнению с их значениями без ТО; при увеличении периодичности контроля T_K их значения асимптотически приближаются к соответствующим значениям, полученным без проведения ТО;

2) при замещающем резервировании все показатели существенно улучшаются по сравнению с их значениями при постоянном резервировании; при этом все тенденции влияния ТО сохраняются такими же;

3) коэффициент технического использования $K_{ти}$, являющийся комплексным показателем надежности с учетом проведения ТО, возрастает с увеличением T_K , однако это возрастание не является асимптотическим, при других исходных данных зависимость $K_{ти}$ от T_K может иметь экстремум (максимум).

Теперь произведем такие же расчеты (путем моделирования) для случая, если варьируется уровень ТО u_{TO4} при фиксированном значении периодичности контроля T_K . Зафиксируем значение $T_K = 3000$ ч, а величину u_{TO4} будем варьировать в

¹ Подробности ввода исходных данных рассмотрены в [5].

диапазоне $[0, 1]$ с интервалом $0,1$. Для экономии места приведем полученные результаты только для показателя \tilde{T}_0 , этого вполне достаточно для того,

чтобы получить представление о характере влияния параметра $u_{ТО4}$. Соответствующие графики для показателя \tilde{T}_0 приведены на рис. 5.

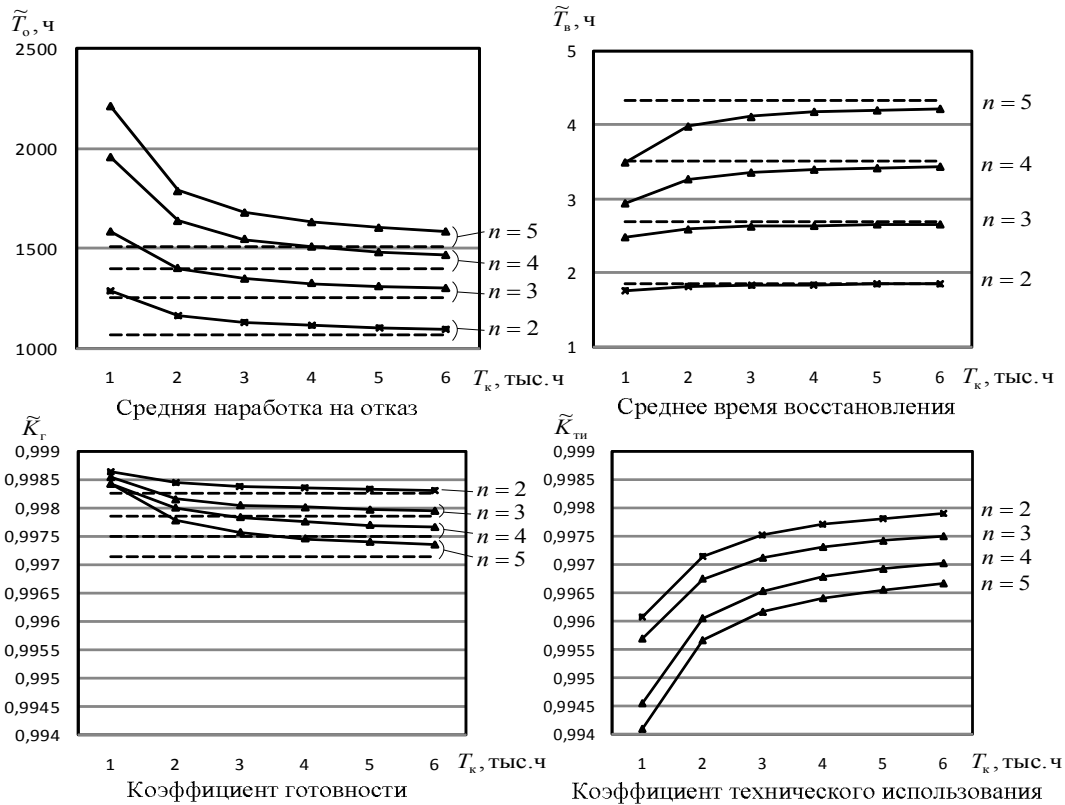


Рис. 3. Графики зависимости показателей надежности тестового объекта от периодичности контроля T_k при проведении ТО по состоянию резервированного элемента e_4 при $u_{ТО4} = 0,5$ (постоянное резервирование)

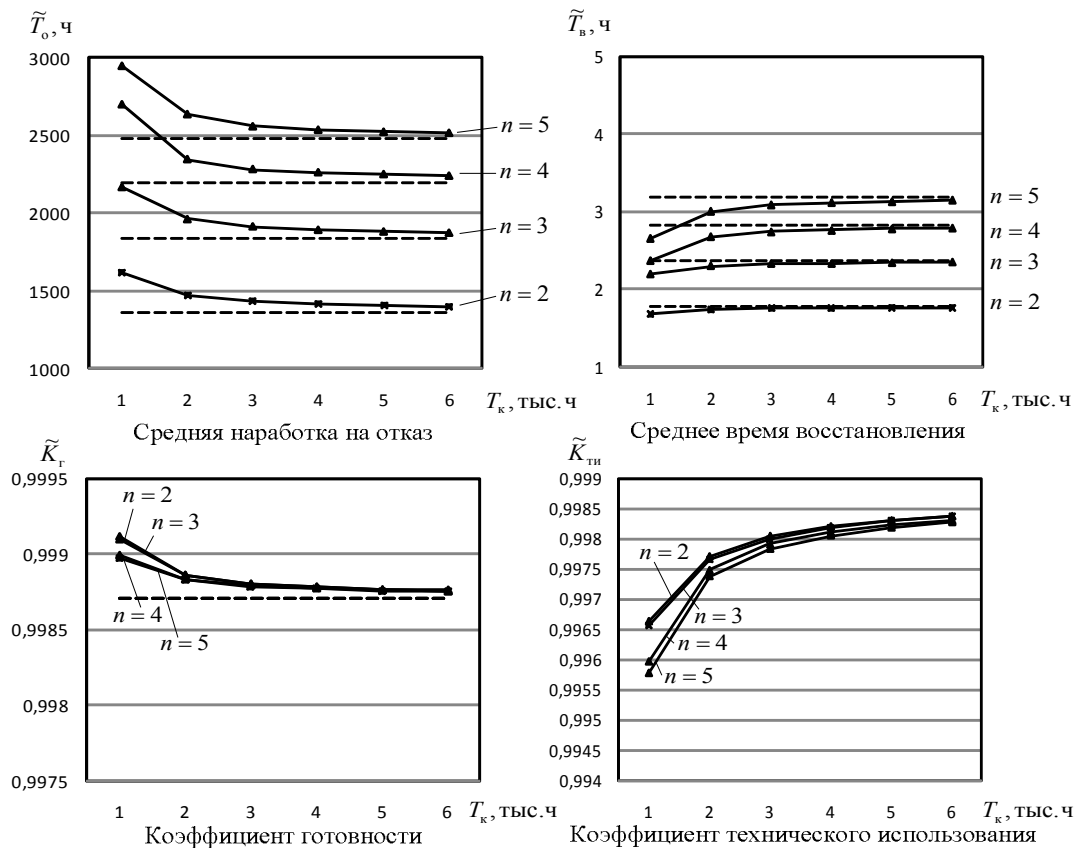


Рис. 4. Графики зависимости показателей надежности тестового объекта от периодичности контроля T_k при проведении ТО по состоянию резервированного элемента e_4 при $u_{ТО4} = 0,5$ (замещающее резервирование)

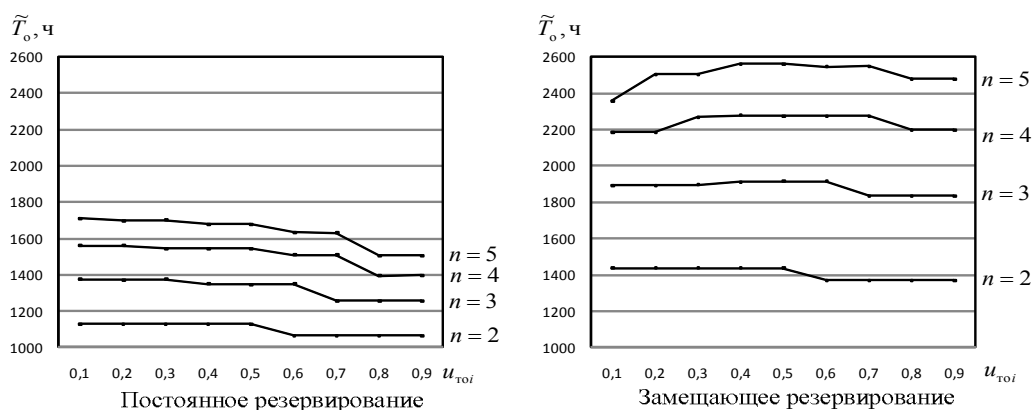


Рис. 5. Графики зависимости средней наработки на отказ T_0 от задаваемого значения u_{TO4} при проведении ТО по состоянию элемента e_4

По графикам видно, что параметр u_{TO4} скачкообразно влияет на показатель T_0 , это вполне соответствует физическому смыслу моделируемого процесса. Из очевидных физических соображений должно быть понятно, что скачки показателей надежности должны происходить в точках u_{TO4} , значения которых кратны величине $1/n$. Величина этих скачков определяется по результатам моделирования.

Выводы

В статье рассмотрена модель ТО по состоянию резервированных элементов объекта РЭТ в случае, если в качестве критерия состояния резервированного элемента принимается количество элементов, остающихся исправными. На простом примере произведено исследование данной модели с целью выяснения влияния параметров ТО на ПН объекта РЭТ, полученные в результате исследования данные дают полное представление о характере этого влияния.

В качестве инструмента исследований мы использовали имитационную статистическую модель [5], поэтому побочным результатом проведенного исследования можно считать демонстрацию воз-

можностей этой модели и косвенное подтверждение ее адекватности.

Список литературы

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Введ. с 01.01.1997.
2. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введ. с 01.01.1980.
3. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
4. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введ. с 01.07.1990.
5. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей. Монография / С.В. Ленков, К.Ф. Борjak, Г.В. Банзак [и др.]: под ред. С.В. Ленкова. – Одесса: ВМВ, 2014. – 256 с.
6. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – 45 с.

Поступила в редколлегию 11.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ З РЕЗЕРВОВАНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

С.В. Ленков, В.М. Цицарев, Д.В. Зайцев, Я.М. Проценко

В статті приводяться короткі відомості про модель процесу технічного обслуговування (ТО) за станом об'єкту радіоелектронної техніки (РЕТ), що має в своєму складі резервовані елементи. В моделі передбачено, що резервування може бути постійним або заміщаючим. Моделювання відбувається методом імітаційного статистичного моделювання. В якості результатів моделювання виходять прогнозні оцінки показників надійності об'єкту РЕТ, в складі якого є обслуговуючі резервовані елементи. Наводиться простий приклад результатів моделювання, на конкретному прикладі досліджується залежність показників надійності об'єкту від параметрів ТО.

Ключові слова: об'єкт радіоелектронної техніки, показники надійності, імітаційне статистичне моделювання, технічне обслуговування за станом.

DESIGN THAT ON THE STATE OF OBJECTS OF RADIO ELECTRONIC TECHNIQUE WITH THE RESERVED ELEMENTS

S.V. Lenkov, V.M. Cicarev, D.V. Zaycev, Ya.M. Procenko

In the article short information is presented about the model of process of technical service on the state the object of radio electronic technique (RET), having the reserved elements in the composition. In a model foreseen, that backuping can be permanent or deputizing. A design is carried out a statistical simulation technique. The prognosis estimations of reliability of object of RET, which the served reserved elements are in composition, indexes turn out as results of design. Led stand example of design results, on a concrete example dependence of reliability of object indexes is probed on parameters of servicing.

Keywords: object of radio electronic technique, reliability indexes, imitation statistical design, technical service on the state.