

УДК 004.052

С.В. Ленков, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Военного института Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, г. Киев,
Г.Б. Жиров, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, г. Киев,
И.В. Толлок, кандидат педагогических наук, начальник Военного института Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, г. Киев,
Е.С. Ленков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Военного института телекоммуникаций и информатизации, г. Киев

ИМИТАЦИОННАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ГРУППИРОВКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В статье усовершенствована имитационная статистическая модель процессов технического обслуживания и ремонта группировки объектов сложной радиоэлектронной техники. Процесс технического обслуживания и ремонта (ТОиР) группировки объектов техники по своему содержанию отличается от процесса ТОиР одного объекта. Отличие состоит в том, что в него добавляются общие элементы, связанные с участием в процессе ТОиР ремонтных органов и складов, обеспечивающих поставку необходимого запасного имущества, инструмента и принадлежности (ЗИП).

Усовершенствование состоит в том, что в модели введены новые процедуры и механизмы для моделирования составляющих процессов, связанных с использованием ремонтных органов и источников поставок ЗИП, которые являются общими для группировки.

Ключевые слова: имитационная статистическая модель, показатели надежности, показатели стоимости эксплуатации, техническое обслуживание и ремонт, надежность группировки техники.

У статті вдосконалено імітаційну статистичну модель процесів технічного обслуговування і ремонту угруповання об'єктів складної радіоелектронної техніки. Процес технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) угруповання об'єктів техніки за своїм змістом відрізняється від процесу ТОіР одного об'єкта. Відмінність полягає в тому, що в нього додаються загальні елементи, пов'язані з участю в процесі ТОіР ремонтних органів і складів, що забезпечують постачання необхідного запасного майна, інструменту та приладдя ЗІП.

Удосконалення полягає в тому, що в моделі введені нові процедури й механізми для моделювання складових процесів, пов'язаних з використанням ремонтних органів і джерел поставок ЗІП, які є загальними для угруповання.

Ключові слова: імітаційна статистична модель, показники надійності, показники вартості експлуатації, технічне обслуговування та ремонт, надійність угруповання техніки.

In the paper the imitation statistical model of processes of maintenance and repairing of grouping objects of complex electronic equipment is improved. The process of maintenance and repair of the grouping of objects of technology in its content differs from the process of maintenance of one object. The difference lies in the fact that it adds the common elements associated with the participation in the process of maintenance of repair bodies and warehouses, spare assets, tools and supplies which provide the supply of necessary ZIP.

The improvement is that the model introduced new procedures and mechanisms for modeling the constituent processes associated with the use of repair bodies and supplies of ZIP, which are common to the grouping.

Keywords: *simulation statistical model, reliability indexes, indicators of cost of operation, maintenance and repair, reliability of engineering group*

Введение. На сегодняшний день успешное существование государства в целом и отдельного человека в частности невозможны без постоянной исправной работы сложных технических объектов. Из всего многообразия таких объектов в отдельную группу можно выделить сложные технические объекты радиоэлектронной техники (РЭТ), которые, с точки зрения надежности, являются восстанавливаемыми объектами. Также такие объекты РЭТ характеризуются большой стоимостью, как в разработке, так и при эксплуатации. Для обеспечения требуемого уровня надежности в процессе эксплуатации проводится их техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) [1–3].

Показатели надежности и стоимости эксплуатации объектов РЭТ зависят, как от свойств безотказности и ремонтпригодности объектов, так и от параметров процесса ТОиР, осуществляемого в процессе его жизненного цикла. Решение многочисленных практических задач требует исправной одновременной работы достаточно большого числа образцов техники (и не всегда однотипной). Такие образцы техники можно условно объединить в группировку. Под группировкой объектов техники будем понимать множество технических объектов, размещенных на определенной территории и предназначенных для выполнения некоторой общей задачи. В состав группировки входят также ремонтные органы (РО), склады ЗИП и технические службы, предназначенные для обеспечения процесса ТОиР технических объектов данной группировки. Конечной целью процесса ТОиР в группировке является поддержание работоспособного состояния всех, входящих в ее состав объектов.

Процесс технического обслуживания и ремонта группировки объектов техники по своему содержанию отличается от процесса ТОиР одного объекта. Отличие состоит в том, что в него добавляются общие элементы, связанные с участием в процессе ТОиР ремонтных органов и складов, обеспечивающих поставку необходимого ЗИП.

Постановка задания. В статье решается задача усовершенствования имитационной модели процесса технического обслуживания и ремонта группировки сложных технических объектов. Модель предназначена для прогнозирования показателей надежности объекта РЭТ и стоимости его эксплуатации с целью оптимизации характеристик как самого объекта так и процесса ТОиР.

Результаты исследования. В процессе эксплуатации в технических объектах могут возникать отказы. Предполагается, что при каждом отказе объекта сразу

начинається процес его восстановления. Вначале делается попытка восстановить работоспособность объекта силами и средствами обслуживающего персонала (расчета объекта техники). Если это не удастся сделать расчету, к восстановлению объекта подключается РО. При этом, от расчета требуется максимально достоверное определение причины отказа и своевременный доклад имеющейся информации на вышестоящий уровень группировки. В технической службе группировки принимается решение о необходимости использования РО.

В зависимости от выявленного состояния объекта возможны различные варианты действий по восстановлению объекта:

- восстановление расчетом;
- восстановление на месте с привлечением специалистов РО;
- отправка объекта (или отказавшего элемента) для ремонта в РО.

В каждом из этих вариантов восстановления может потребоваться дополнительное время для доставки ЗИП со складов в случае его отсутствия в ЗИП-0 или в ЗИП-Р.

Очевидно, что возможна ситуация, когда в данный момент времени свободный РО отсутствует (РО занят восстановлением другого отказавшего объекта). В этом случае отказавший объект переходит в состояние ожидания освобождения РО. При этом время простоя объектов в неработоспособном состоянии увеличивается, группировка несет потери в качестве выполнения задач.

На рис. 1 изображен упрощенный алгоритм процесса восстановления объекта техники в случае использования РО.

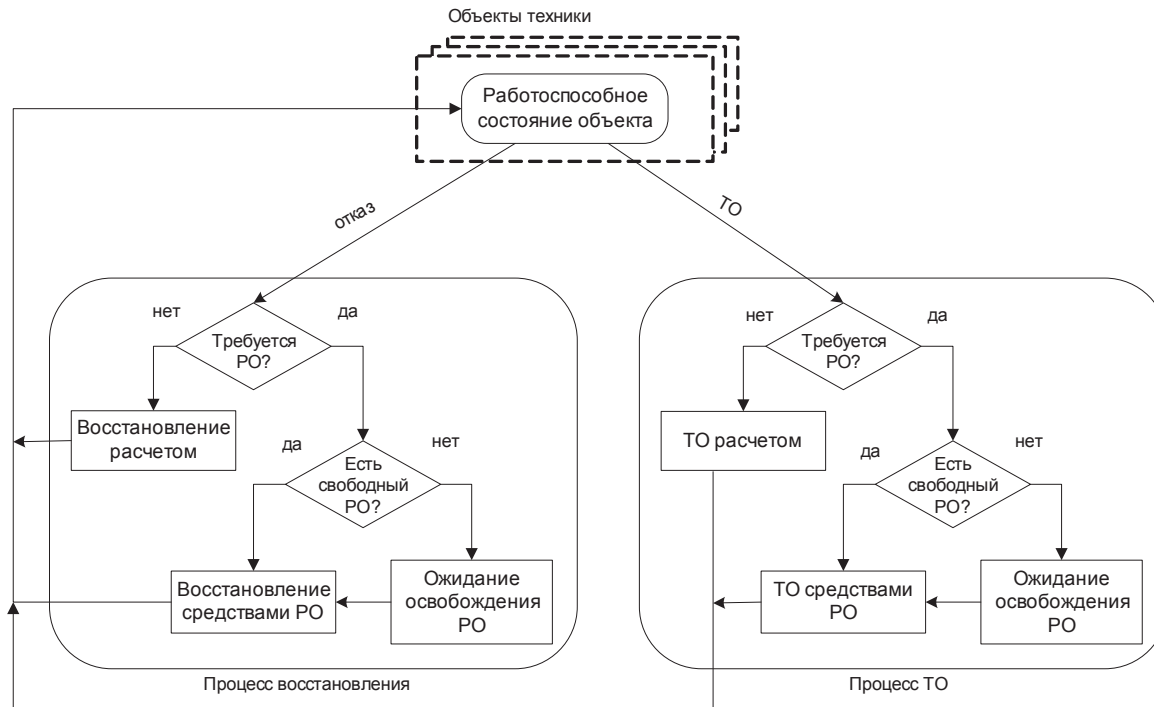


Рис. 1. Упрощенный алгоритм процесса восстановления объекта техники в случае использования ремонтного органа

Для моделирования процесса технического обслуживания и ремонта усовершенствована имитационная статистическая модель (ИСМ), которая учитывает

параметры подсистем РО и ЗИП. Также прогнозируются показатели, характеризующие степень загруженности РО, суммарные задержки, обусловленные ожиданием освобождения РО или доставки запасных элементов из ЗИП.

Исходными данными для ИСМ являются:

параметры объекта: $P_{об}$;

параметры системы ТО: $P_{тос}, P_{тос-а}, P_{тор}$;

параметры системы РО: $P_{ро}$;

параметры системы обеспечения ЗИП: $P_{зип}$;

параметры группировки: $P_{гр}$;

параметры моделирования: $P_{мод}$.

Параметры технических объектов, системы ТО и параметры моделирования описаны в [1; 4–8].

Параметры системы ремонта $P_{ро}$:

$$P_{ро} = \{N_{ро}, \tau_{дро}, \tau_{ро а}, C_{ро}, E_{ро}\}, \quad (1)$$

где: $N_{ро}$ – количество РО в группировке (число каналов ремонта); $\tau_{дро}$ – среднее время движения РО к месту ремонта (доставки объекта в РО); $\tau_{ро а}$ – административное время РО (время подготовки РО к выполнению ремонтных работ); $c_{ро}$ – удельные затраты стоимости при применении РО; $E_{ро}$ – подмножество элементов, отказы которых могут восстанавливаться в данном РО ($E_{ро} \subset E_o$).

На практике РО должны восстанавливать любые отказы, в том числе и отказы элементов, не включенных в множество $E_{ро}$. РО привлекаются для восстановления только в тех случаях, когда расчеты сами не могут справиться с задачей восстановления. Множество $E_{ро}$ определяется пользователем (экспертом) перед началом моделирования.

Параметры системы обеспечения ЗИП $P_{зип}$:

$$P_{зип} = \{\vec{X}_{зип k}, T_{зип k}, \tau_{д зип k}, C_{д зип k}; k = \overline{0, 2}\}, \quad (2)$$

где $\vec{X}_{зип k} = \{x_i\}$ – вектор, определяющий состав k -го ЗИП (ЗИП k -го уровня), в котором x_i – количество элементов i -го типонамала, имеющиеся в составе данного ЗИП ($k = 0, 1$); $T_{зип k}$ – периодичность пополнения k -го ЗИП; $\tau_{д зип k}$ – среднее время доставки элементов из k -го ЗИП ($k = 0, 1, 2$); $C_{д зип k}$ – стоимость доставки элементов из k -го ЗИП.

Данная статья посвящена моделированию ТОиР группировки сложных технических объектов [8; 9]. Поэтому параметры такой группировки $P_{гр}$ можно представить в виде системы уравнений:

$$P_{гр} = \{N_{об}, c_{отк}, c_{то}\}, \quad (3)$$

где $N_{об}$ – число объектов техники в группировке; $c_{отк}$ и $c_{то}$ – удельная стоимость потерь при отказе и ТО объекта.

Вся исходная информация вводится в БД программы ISMPN перед началом моделирования.

В качестве выходной информации модели ИСМ вычисляются статистические оценки следующих показателей:

- показатели надежности и стоимости эксплуатации объекта:
- T_0 – среднее время между отказами объекта;
- T_B – среднее время восстановления;
- T_{Π} – среднее время простоя в неработоспособном состоянии;
- K_{Γ} – коэффициент готовности;
- $K_{\text{ти}}$ – коэффициент технического использования;
- c_3 – удельные затраты стоимости на эксплуатацию объекта;
- показатели использования РО:
- $P_{\text{зан ро}}$ – показатель суммарной занятости РО;
- $\bar{\tau}_{\text{ож в}}, \bar{\tau}_{\text{ож то}}$ – среднее время ожидания освобождения РО при восстановлении (ремонте) и при ТО;
- $\bar{n}_{\text{ож в}}, \bar{n}_{\text{ож то}}$ – среднее число задержек из-за отсутствия свободных РО при восстановлении и ТО;
- дополнительные показатели:
- \bar{n}_0 – среднее число отказов объекта за время эксплуатации T_3 ;
- $\bar{n}_{\text{то}}$ – среднее число ТО, проводимых на объекте за время эксплуатации;
- $T_{\text{то}}$ – средняя продолжительность одного ТО;
- ε – относительная точность результатов моделирования, оцениваемая по статистической погрешности оценки показателя \bar{n}_0 .

Показатели надежности и стоимости вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned}
 T_0 &= \tau_{0\Sigma} \cdot N_{\text{об}} / n_{0\Sigma}; \\
 T_B &= t_{B\Sigma} / n_{0\Sigma}; \\
 T_{\Pi} &= \tau_{\Pi\Sigma} / n_{0\Sigma}; \\
 K_{\Gamma} &= \tau_{0\Sigma} / (\tau_{0\Sigma} + \tau_{\Pi\Sigma}); \\
 K_{\text{ти}} &= \tau_{0\Sigma} / (\tau_{0\Sigma} + \tau_{\Pi\Sigma} + \tau_{\text{то}\Sigma}); \\
 c_{\text{уд}} &= (C_{B\Sigma} + C_{\text{то}\Sigma} + C_{\text{ро}\Sigma}) / (T_3 \cdot N_{\text{об}}),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $n_{0\Sigma}$ – суммарное число отказов объектов за время моделирования; $\tau_{0\Sigma}$, $\tau_{B\Sigma}$, $\tau_{\Pi\Sigma}$, $\tau_{\text{то}\Sigma}$ – накопленное суммарное время наработки между отказами, время восстановления, простоя и ТО соответственно; $C_{B\Sigma}$ и $C_{\text{то}\Sigma}$ – суммарные затраты стоимости на текущий ремонт (восстановление) и ТО, накопленные в процессе моделирования; $C_{\text{ро}\Sigma}$ – суммарные затраты стоимости, связанные с применением РО.

Показатели использования РО вычисляются по формулам:

$$P_{\text{зан ро}} = \tau_{\text{зан ро}\Sigma} / n_{\text{зан ро}\Sigma}, \tag{5}$$

где $\tau_{\text{зан ро}\Sigma}$ – суммарное время занятости РО при выполнении текущих ремонтов или ТО; $n_{\text{зан ро}\Sigma}$ – суммарное число текущих ремонтов и ТО, выполненных в РО;

$$\bar{\tau}_{\text{ож в}} = \tau_{\text{ож в}\Sigma} / n_{\text{ож в}\Sigma}, \tag{6}$$

где $\tau_{\text{ож в}\Sigma}$ – суммарное время ожидания освобождения РО для выполнения восстановительных работ; $n_{\text{ож в}\Sigma}$ – суммарное количество случаев ожидания РО для восстановления;

$$\bar{n}_{\text{ож в}} = n_{\text{ож в } \Sigma} / N_I \quad (7)$$

где N_I – число выполненных итераций моделирования.
Дополнительные показатели:

$$\begin{aligned} \bar{n}_o &= n_{o \Sigma} / (N_I \cdot N_{\text{об}}); \\ \bar{n}_{\text{то}} &= n_{\text{то } \Sigma} / (N_I \cdot N_{\text{об}}); \\ T_{\text{то}} &= \tau_{\text{то } \Sigma} / n_{\text{то } \Sigma}. \end{aligned} \quad (8)$$

Структурная схема основного алгоритма ИСМ изображена на рис. 2.

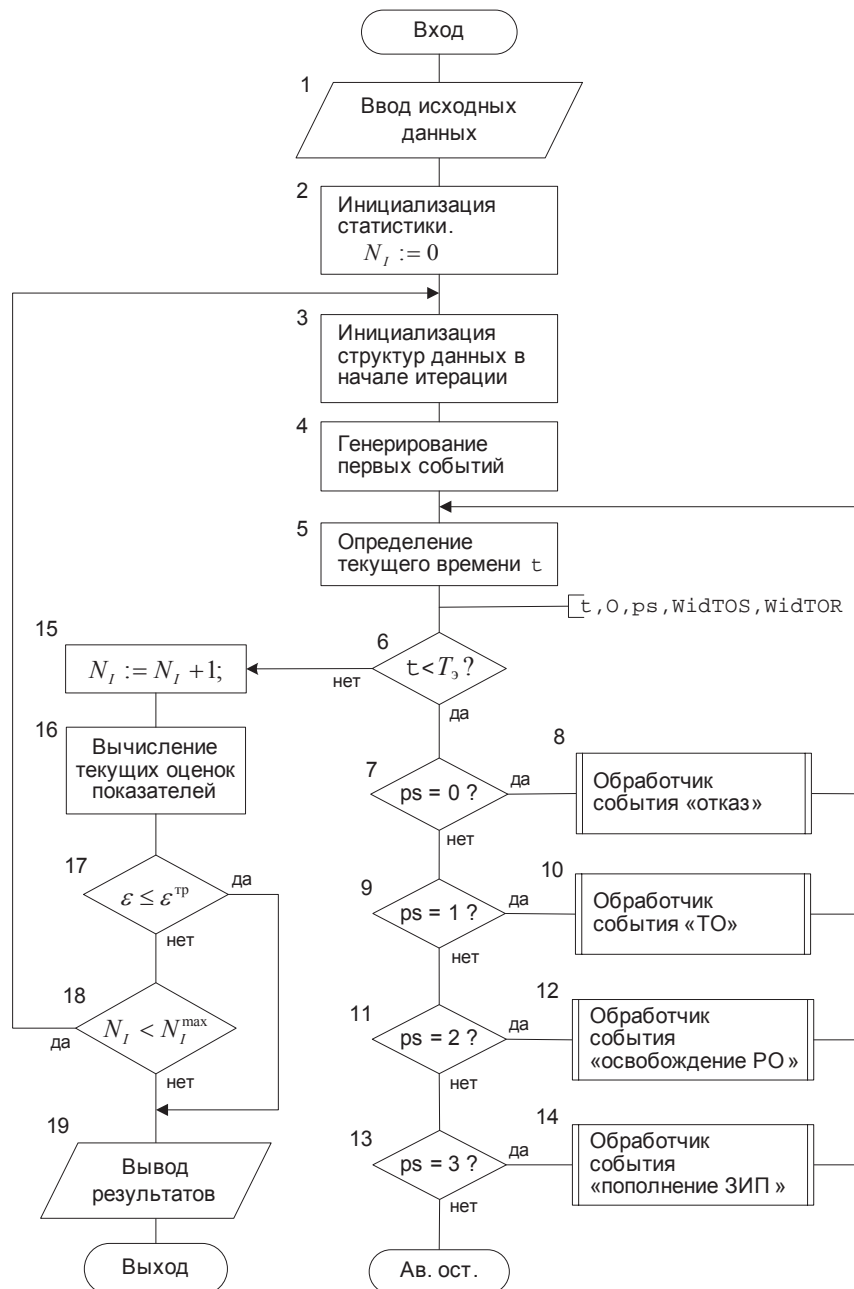


Рис. 2. Алгоритм моделирования процесса технического обслуживания и ремонт группировки техники

Оператор 1 осуществляет ввод исходных данных. Основная часть исходной информации берется из БД программы ISMPN. При вводе сразу же создаются все необходимые структуры данных.

Оператор 2 иницирует переменные и массивы, в которых будет накапливаться необходимая статистическая информация. Устанавливается начальное значение переменной N_I – количество выполненных итераций моделирования. Под итерацией понимается однократное моделирование процесса ТОиР на заданном интервале эксплуатации T_s .

Оператор 3 инициализирует данные перед началом каждой итерации моделирования.

Оператор 4 генерирует и сохраняет в календаре событий запланированные значения времени наступления всех событий.

В качестве календаря событий используются следующие множества:

$\{O.E1.t\}$ – множество запланированных значений времени отказа всех элементов $O.E1$ всех объектов ($\forall O \in List_O, \forall E1 \in O.List_E1$). Число элементов этого множества равно $N_{об} \cdot |List_Eu|$; $\{O.t_TOS.t\}$ и $\{O.t_TOR.t\}$ – множества запланированных значений времени ТО для стратегий ТОС и ТОР соответственно ($t_TOS \in List_t_TOS, t_TOR \in List_t_TOR$); $\{t_{зип-0}, t_{зип-1}\}$ – запланированные значения времени пополнения ЗИП-0 и ЗИП-1.

Случайные моменты времени первых отказов формируются оператором:

$$O.E1.t := O.E1.E.Gener_otkaz,$$

где $E1.E.Gener_otkaz$ – процедура-функция, которая генерирует случайную величину, подчиняющуюся DN -распределению с параметрами безотказности элемента $E1$.

Время первых ТО в списках $O.List_t_TOS$ и $O.List_t_TOR$ устанавливается из соответствующих данных о видах ТО $List_widTOS$ и $List_widTOR$.

Время первых пополнений ЗИП берется из БД:

$$t_{зип-0} := T_{зип-0}, \quad t_{зип-1} := T_{зип-1},$$

где $T_{зип-0}$ и $T_{зип-1}$ – периодичность пополнения ЗИП-0 и ЗИП-1, взятые из БД.

Оператор 5 определяет текущее модельное время t и данные, связанные с этим событием. Время t определяется путем последовательного просмотра множеств $\{O.E1.t\}$, $\{O.t_TOS.t\}$, $\{O.t_TOR.t\}$ и $\{t_{зип-0}, t_{зип-1}\}$ и принятия в качестве t наименьшего из найденных значений времени. Если время t найдено при просмотре множества $\{O.E1.t\}$, и при этом $O.E1.s=0$, то текущим событием является событие “отказ”. Если $O.E1.s=1$, то событием является “освобождение РО” после восстановления объекта O . Если текущее событие “отказ”, то формируется признак $ps=0$, если событие “освобождение РО” после восстановления, то формируется признак $ps=1$.

Если время t найдено при просмотре множества $\{O.tk\}$, то в этом случае текущим событием является или “ТО”, или “освобождение РО” после ТО. Если событие “ТО”, то формируется признак $ps=2$, если событие “освобождение РО” после ТО, то формируется признак $ps=1$.

Оператор 6 проверяет условие завершения итерации моделирования. Если итерация продолжается ($t < T_3$), далее выполняются операторы 7–14, которые анализируют и обрабатывают текущее событие.

Если при выполнении оператора 6 текущее время t превысит заданное значение продолжительности эксплуатации T_3 , управление передается оператору 15, в котором подсчитывается число выполненных итераций моделирования N_I . Оператором 16 рассчитываются оценки показателей качества процесса ТОиР, а также текущая оценка точности результатов моделирования ε .

Если текущая точность достигла требуемого значения ε^{TP} , или количество выполненных итераций N_I достигло заданного максимального значения N_I^{\max} , то на этом процесс моделирования завершается – выполняется оператор 19, который полученные результаты выводит на экран ПК. В противном случае оператор 18 передает управление оператору 3 и процесс моделирования продолжается описанным выше образом.

Выводы. В статье усовершенствована имитационная статистическая модель процессов ТОиР группировки объектов техники. Модель положена в основу программного комплекса ISMPN. Усовершенствование состоит в том, что в модели введены новые процедуры и механизмы для моделирования составляющих процессов, связанных с использованием ремонтных органов и источников поставок ЗИП, которые являются общими для группировки. В результате, получаемые с помощью ИСМ, оценки прогнозируемых показателей надежности и стоимости эксплуатации зависят не только от параметров самого объекта, но и от параметров системы ремонтных органов и источников поставок ЗИП, их удаленности от объектов техники, от количества объектов в группировке.

Введены также дополнительные показатели, характеризующие интенсивность использования ремонтных органов, в частности: среднее время занятости ремонтного органа; среднее время ожидания освобождения ремонтного органа; среднее число задержек начала текущего ремонта и ТО из-за отсутствия свободных ремонтных органов, и другие показатели.

В модели полностью или частично учитываются характеристики самого объекта РЭТ. Практическая значимость модели заключается в возможности и необходимости ее использования при создании новых или модернизации объектов сложной радиоэлектронной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Sergey Lenkov, Konstantin Borjak, Gennady Banzak, Vadim Braun, etc.* Forecasting to reliability complex object radio-electronic technology and optimization parameter their technical usage with use the simulation statistical models: [monography] in English / under edition S.V. Lenkov. Odessa: Publishing house “ВМВ”, 2014. 252 p.

2. *Буточнов А.Н., Креденцер Б.П., Тоценко В.Г.* и др. Основы надежности и техническое обеспечение радиоэлектронных средств РТВ ПВО. К.: КВИРТУ ПВО, 1982. 226 с.

3. *Черкесов Г.Н.* Оценка надежности систем с учетом ЗИП. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.

4. *S. Lenkov, G. Zhyrov, D. Zaitsev etc.* Features of modeling failures of recoverable complex technical objects with a hierarchical constructive structure. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 4/4 (88). P. 34–42. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108395. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/issue/view/6544>.

5. *Жиров Г.Б.* Алгоритм моделювання процесів технічного обслуговування за ресурсом складних радіоелектронних об'єктів. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2017. № 57. С. 24–30.

6. *Ленков С.В., Ленков Є.С.* Формалізована методика оптимізації параметрів стратегії технічного обслуговування за ресурсом складних виробів тривалої експлуатації. Журнал “Сучасна спеціальна техніка”. 2016. № 4(47). С. 3–8.

7. *Жиров Г.Б., Ленков Є.С., Толоч І.В.* Аналіз математичних моделей технічного обслуговування складних технічних об’єктів. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2017. Вип. 2(51). С. 153–158.

8. *Боряк К.Ф., Браун В.О., Ленков С.В.* та ін.. Моделі процесів витрат і поповнення ресурсу складних відновлюваних об’єктів і систем радіоелектронної техніки. Монографія. Київ: Знання України, 2008. 267 с.

9. *Толоч І.В.* Моделирование процессов расходования и восстановления ресурса группировки объектов военной техники. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К., 2017. № 56. С. 64–72.

Отримано 04.01.2018

Рецензент Рибальський О.В., д.т.н., проф.