

УДК 621.396

Г.Б. Жиров<sup>1</sup>, Е.С. Ленков<sup>2</sup><sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев<sup>2</sup> Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В статье предложена усовершенствованная имитационная модель процесса технического обслуживания и ремонта сложного технического объекта. Модель предназначена для прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта с учетом проведения различных стратегий технического обслуживания и плановых ремонтов. В отличие от известных, данная модель учитывает вероятность отказов программного обеспечения, а также использует более широкий набор математических моделей безотказности элементов объекта.

**Ключевые слова:** техническое обслуживание, плановый ремонт, диффузные распределения, имитационная модель.

### Введение

Большинство жизненно важных процессов, связанных с обеспечением безопасности государства в целом и человека в отдельности, зависит от 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 (заданного) уровня надежности в процессе эксплуатации проводится техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) изделий. Необходимость проведения технического обслуживания заключается в своевременной замене элементов, которые находятся в предотказовом состоянии, что приводит к улучшению показателей безотказности. Ремонт проводится с целью восстановления исправного или работоспособного состояния объекта, а также восстановления ресурса всего объекта или его части [1; 2]. Рассматриваемые объекты РЭТ характеризуются определенными особенностями, которые влияют и многократно усложняют задачу построения математических моделей оценки и прогнозирования показателей надежности, а также стоимости эксплуатации объектов РЭТ

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. Для того чтобы иметь возможность оптимизировать характеристики объекта и параметры системы ТОиР на этапе разра-

ботки объекта, необходимо предварительно разработать модели, которые устанавливали бы связь между параметрами объекта и системы и прогнозируемыми показателями надежности и стоимости эксплуатации объекта РЭТ.

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

### Результаты исследования

Рассмотрим обобщенную математическую модель процесса ТОиР для отдельного объекта РЭТ с целью установления математической зависимости между показателями качества процесса ТОиР и его параметрами. В качестве показателей качества процесса ТОиР будем использовать известные показатели надежности:  $T_0$  – средняя наработка на отказ объекта,  $T_B$  – среднее время восстановления,  $K_T$  – коэффициент готовности,  $K_{ТИ}$  – коэффициент технического использования;  $C_Э$  – удельная стоимость эксплуатации объекта.

Параметрами процесса ТОиР выступают характеристики надежности и стоимости элементов объектов РЭТ и составных подсистем ТОиР, которые можно свести в 3 группы: Б – параметры безотказности, В – параметры ремонтпригодности, С – параметры стоимости. Каждая подсистема ТОиР характеризуется своими параметрами:  $P_{ТО}$ ,  $P_{РО}$ ,  $P_{ПР}$  – параметры подсистем ТО, ремонтных органов (РО) и плановых ремонтов (ПР),  $P_{ЗИП}$  – параметры подсистемы обеспечения ЗИП [1].

Любой сложный технический объект, с точки зрения функционирования по назначению и проведению ТОиР, может в произвольный момент времени находиться в одном из состояний:  $S_0$  – объект находится в состоянии ожидания,  $S_1$  – объект функционирует по назначению,  $S_2$  – проводится текущий ремонт (ТР) объекта,  $S_3$  – проводится ТО объекта,  $S_4$  – проводится плановый ремонт объекта.

Данные состояния являются состояниями процесса ТОиР  $S \in \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$ .

Переходы из одного состояния в другое можно представить графом состояний и переходов, рис. 1, причем переходы могут происходить как в случайные, так и в строго определенные моменты времени с интенсивностями, которые зависят от параметров самого объекта так и системы ТОиР.

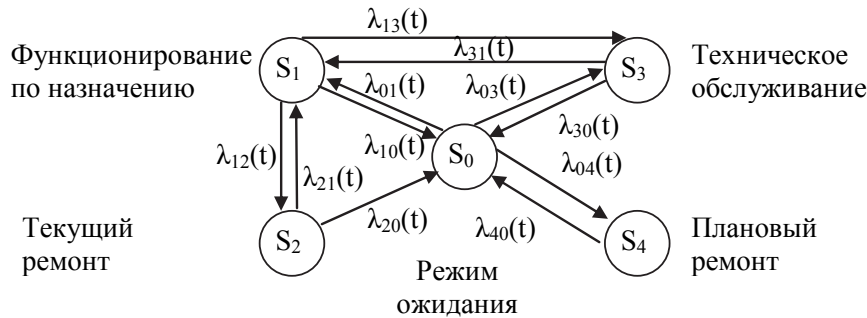


Рис. 1. Граф состояний и переходов процесса ТОиР

Физический смысл интенсивностей переходов следующий:  $\lambda_{01}(t)$ ,  $\lambda_{10}(t)$  – интенсивности включений и выключений объекта, определяются внешними факторами, которые не зависят от параметров системы ТОиР;  $\lambda_{12}(t) = \lambda_{12}(t/B, P_{ТО})$  – интенсивность отказов объекта, зависит от параметров безотказности и параметров подсистемы ТО;  $\lambda_{20}(t) = \lambda_{20}(t/B, P_{РО}, P_{ЗИП})$  и  $\lambda_{21}(t) = \lambda_{21}(t/B, P_{РО}, P_{ЗИП})$  – интенсивности восстановления работоспособного состояния, зависят от параметров ремонтпригодности, а также параметров подсистем РО и обеспечения ЗИП;  $\lambda_{03}(t) = \lambda_{03}(t/P_{ТО})$  и  $\lambda_{13}(t) = \lambda_{13}(t/P_{ТО})$  – интенсивности проведения ТО объекта (моменты времени проведения ТО могут быть как случайными, так и строго детерминиро-

ванными);  $\lambda_{30}(t) = \lambda_{30}(t/B, P_{РО}, P_{ЗИП})$   $\lambda_{31}(t) = \lambda_{31}(t/B, P_{РО}, P_{ЗИП})$  – интенсивности завершения ТО;  $\lambda_{04}(t) = \lambda_{04}(t/P_{ПР})$  – интенсивность проведения ПР;  $\lambda_{40}(t) = \lambda_{40}(t/B, P_{РО}, P_{ЗИП})$  – интенсивность завершения ПР. Все интенсивности переходов могут быть определены исходя из функций распределения или плотностей распределения соответствующих им случайных величин. Построенный на рис. 1 граф является несколько упрощенной математической моделью (в графическом виде) процесса ТОиР, т.к. некоторые возможные переходы не рассматривались ( $S_0 \rightarrow S_2$ ,  $S_1 \rightarrow S_4$  и  $S_3 \rightarrow S_2$ ) в связи с их малой вероятностью. Исходя из графа состояний и переходов, можно записать следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= \lambda_{01}(t)p_1(t) + \lambda_{20}(t)p_2(t) + \lambda_{30}(t)p_3(t) - (\lambda_{01} + \lambda_{03} + \lambda_{04})p_0(t); \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{01}(t)p_0(t) + \lambda_{21}(t)p_2(t) + \lambda_{31}(t)p_3(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{13})p_1(t); \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_{12}(t)p_1(t) - (\lambda_{20} + \lambda_{21})p_2(t); \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{03}(t)p_0(t) + \lambda_{13}(t)p_1(t) - (\lambda_{30} + \lambda_{31})p_3(t); \\ \frac{dp_4(t)}{dt} &= \lambda_{04}(t)p_0(t) - \lambda_{40}p_4(t). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решением системы уравнений (1) является вектор вероятностей  $p_i(t) = p_i(t/B, P_{ТО}, P_{РО}, P_{ПР}, P_{ЗИП})$ ,  $i = \overline{0,4}$ , из которого можно получить большинство показателей качества процесса ТОиР. Однако реально получить вектор вероятностей оказывается практически невозможно по следующим причинам: параметры функций интенсивностей переходов представ-

лены в обобщенном, а не в явном виде, а также интенсивности переходов являются функциями времени, что значительно усложняет решение системы уравнений (1). Также в модели процесса ТОиР не входят параметры стоимости. Для устранения данных недостатков предлагается использовать имитационную модель процесса технического обслуживания и

ремонта, исходной информацией для которой выступают статистические данные о параметрах объекта, ТОиР, а также стоимостные показатели. Сущность модели состоит в установлении зависимостей показателей качества процесса ТОиР от параметров реального объекта и параметров системы ТОиР.

Усовершенствованная модель основывается на имитационно статистических моделях, описанных

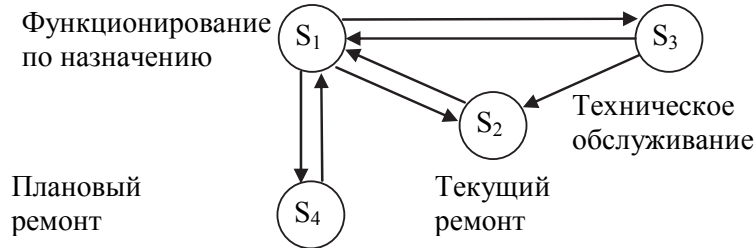


Рис. 2. Граф состояний и переходов имитируемого процесса

По аналогии с [1; 3], при разработке модели будет использоваться «календарь событий» (КС), в который записываются и перезаписываются (после обработки) моменты времени имитируемых событий, например отказ  $i$ -го элемента или переход в режим ТО и т. д.

В модели непосредственно имитируются три типа событий: «отказ» (переходы  $S_1 \rightarrow S_2$ ,  $S_3 \rightarrow S_2$ ), «начало ТО» (переход  $S_1 \rightarrow S_3$ ) и «начало ПР» (переход  $S_1 \rightarrow S_4$ ). Предполагается, что после отказа сразу начинается процесс восстановления (текущий ремонт) объекта. События «восстановление» (переход  $S_2 \rightarrow S_1$ ), «завершение ТО» (переход  $S_3 \rightarrow S_1$ ) и «завершение ПР» (переход  $S_4 \rightarrow S_1$ ) имитируются неявно, путем выполнения определенных действий при обработке этих событий.

Событие «отказ» имитируются для всех отказывающих элементов  $e_i \in E_0$ ,  $i = \overline{1, N}$ , где  $E_0$  – элементы объекта, которые входят в структурную схему надежности,  $N$  – количество элементов структурной схемы надежности. Обработка события «отказ» заключается в генерировании случайного значения наработки до отказа элемента и запоминании в КС момента времени его следующего отказа. Одновременно при этом осуществляется накопление статистики о времени нахождения объекта в работоспособном состоянии.

Событие «восстановление» неявно учитывается при планировании следующего отказа. Обработка события «восстановление» заключается в накоплении статистики о продолжительности восстановления.

Переход в состояние ТО планируются поразному, в зависимости от выбранной стратегии ТО. Если выбрана стратегия технического обслуживания по состоянию (ТОС), время следующего ТО является случайным, и его значение зависит от текущего ТС объекта. Если выбрана стратегия технического обслуживания по ресурсу (ТОР), то время до следующего ТО является детерминированным, его величина

(ИСМ) в [1; 3; 4]. Для построения модели упростим граф состояний и переходов процесса ТОиР, рис. 1 и введем ограничение на режим работы объекта РЕТ, будем предполагать, что объект не работает в циклическом режиме (состояние «режим ожидания» не рассматривается). Исходя из данного ограничения, граф состояний и переходов процесса будет иметь следующий вид, рис. 2.

определяется заданной периодичностью ТО. Обработка процедур в состоянии ТО заключается в перепланировании в КС моментов времени следующих отказов для всех элементов (узлов), которые должны быть обслужены при проведении ТО. Этим имитируется обновление обслуживаемых элементов. Одновременно накапливается статистика о продолжительности и стоимости ТО. В случае стратегий ТОС также накапливается статистика о периодичности ТО.

Моделирование ТО может осуществляться в соответствии с одной из стратегий: ТОС с постоянной периодичностью контроля; ТОС с адаптивным изменением периодичности контроля; ТО по ресурсу.

Переход в состояние ПР планируются в соответствии с заданными детерминированными параметрами системы плановых ремонтов (СПР). Запланированное время следующего ПР определяется как текущее время плюс межремонтный ресурс, установленный для данного вида ПР. Обработка процедур в состоянии ПР заключается в имитации обновления подмножества элементов, подлежащих замене при данном виде ПР. Обновление элементов (так же, как и при ТО) имитируется путем перепланирования моментов времени их отказов, новые (случайные) значения времени отказов элементов пересохраняются в КС.

Процесс последовательного «просмотра» КС и обработки событий «отказ», «переход в состояние ТО» и «переход в состояние ПР» повторяется циклически в течение всего времени моделирования. После обработки очередного явного события за счет его перепланирования происходит «продвижение» процесса по оси модельного времени. Этот процесс продолжается до тех пор, пока значение текущего модельного времени не достигнет заданного значения продолжительности эксплуатации объекта [1; 3].

Для моделирования в базу данных модели необходимо ввести, помимо показателей объекта и процесса ТОиР, параметры самого процесса моделиро-

вания:  $T_{\Sigma}$  – продолжительность эксплуатации объекта,  $\varepsilon^{TP}$  – заданная точность результатов моделирования,  $N_i^{max}$  – количество циклов моделирования.

Выходной информацией модели являются оценки показателей качества процесса ТОиР, которые были введены ранее:  $T_0$ ,  $T_B$ ,  $K_{\Gamma}$ ,  $K_{TI}$ ,  $C_{\Sigma}$ .

Помимо указанных точечных показателей в качестве выходной информации в результате модели-

рования формируется оценка функции параметра потока отказов объекта  $\Omega(t)$ , которая содержит информацию о динамике свойства безотказности объекта на заданном периоде эксплуатации.

Таким образом, исходя из предложенного графа состояний и переходов (рис. 2), можно создать следующий алгоритм имитационной модели процесса ТОиР рис. 3:

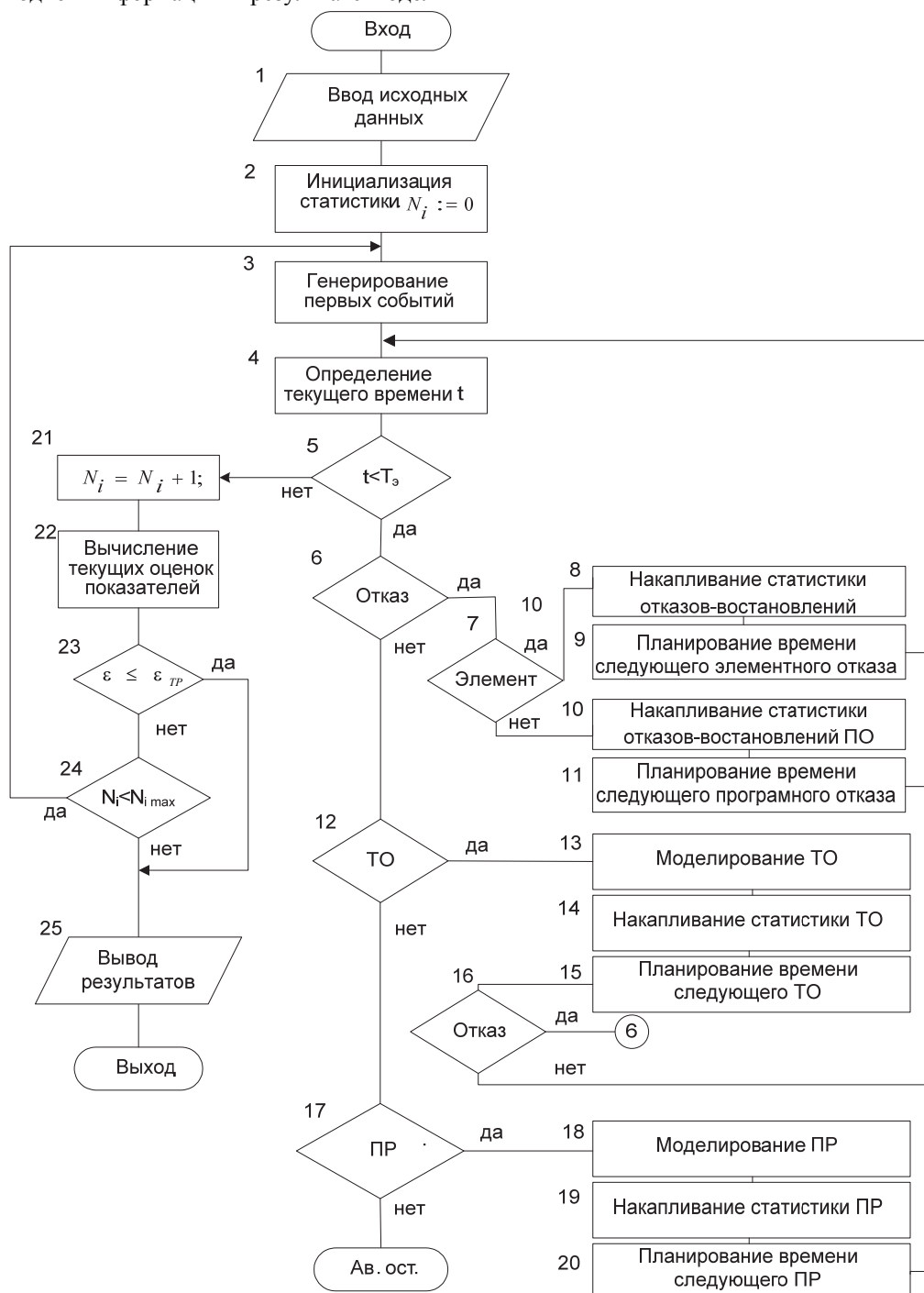


Рис. 3. Алгоритм имитационной модели процесса ТОиР

Оператор 1 осуществляет ввод исходных данных. Оператор 2 устанавливает начальные значения переменных, в которых будет накапливаться необ-

ходимая статистика. Оператор 3 генерирует и сохраняет в КС моменты времени первых событий «отказ», «переход в ТО» и «переход в ПР». Моменты времени

первых отказов определяются путем генерирования случайных чисел, подчиненных DN-распределению (для элементов электронной части объекта  $e_j \in E_E$ ) и DM-распределению (для элементов механической части объекта  $e_k \in E_M$ ), причем  $E_E \cup E_M = E_0$  [5]. Оператор 4 определяет текущее модельное время  $t$  путем поиска наименьшего значения в КС. Одновременно определяется тип события. Оператор 5 проверяет условие завершения текущего цикла моделирования. Если время  $t$  не вышло за пределы заданного периода эксплуатации  $T_3$  ( $t < T_3$ ), то это означает, что текущий цикл моделирования еще не завершился, и далее выполняются операторы 6–20. Оператор 6 проверяет, является ли текущее событие отказом. Если текущее событие «отказ», то выполняются операторы 8–10, осуществляющие обработку этого события. Операторы 12–15 обрабатывают событие «переход в ТО» и саму процедуру ТО. Оператор 16 проверяет событие «внезапный отказ в ходе ТО», а его обработку проводят операторы 6–11. Операторы 17–20 обрабатывают событие «переход в ПР», а также процедуру ПР. Если при выполнении оператора 5 выполнилось условие  $t \geq T_3$ , то управление передается операторам 21–25.

Отличия данной модели от известных [1; 3; 4] состоит в возможности моделирования отказа при проведении ТО и соответственно, перехода в состояние «текущий ремонт» непосредственно из состояния «ТО»; использование DM-распределения для прогнозирования показателей безотказности элементов механической части объекта, а также учет возможности прогнозирования отказов программного обеспечения, а в качестве математической модели безотказности ПО выбрано распределение Вейбула.

## Выводы

Усовершенствованная имитационная модель может применяться для прогнозирования показателей

надежности и стоимости эксплуатации сложного объекта РЭТ с учетом проведения различных стратегий технического обслуживания и плановых ремонтов.

В модели полностью или частично можно учитывать характеристики самого объекта РЭТ, и параметры принимаемых для данного объекта систем ТО и ПР. Практическая значимость информационной модели заключается в возможности и необходимости ее использования при создании новых или модернизации объектов РЭТ.

## Список литературы

1. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей / С.В. Ленков, К.Ф. Борзяк, Г.В. Банзак, В.О. Браун, В.А. Осыпа, С.А. Паиков, В.Н. Цыцарев, Ю.В. Березовская. – Одесса: Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.
2. Основы надежности и техническое обеспечение радиоэлектронных средств РТВ ПВО / А.Н. Буточнов, Б.П. Креденцер, В.Г. Тоценко, В.Н. Цыцарев и др. – К.:КВИРТУ ПВО, 1982. – 226 с.
3. Прогнозирование показателей надежности и стоимости эксплуатации сложных объектов РЭТ с использованием имитационной статистической модели / С.В. Ленков, В.О. Браун, В.А. Осыпа, С.А. Паиков, В.Н. Цыцарев, Ю.В. Березовская // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2013. – №43. – С. 53-61.
4. Браун В.О. Имитационная статистическая модель для прогнозирования безотказности сложных объектов радиоэлектронной техники / В.О. Браун, В.Н. Цыцарев // Электронное моделирование. – К.:2004. – №4. – С. 49-52.
5. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

Поступила в редколлегию 13.02.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. М.К. Жердев, Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев.

## ВДОСКОНАЛЕНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ СКЛАДНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА

Г.Б. Жиров, Є.С. Ленков

У статті запропоновано вдосконалену імітаційну модель процесу технічного обслуговування і ремонту складного технічного об'єкта. Модель призначена для прогнозування показників надійності і вартості експлуатації об'єкта з урахуванням проведення різних стратегій технічного обслуговування і планових ремонтів. На відміну від відомих, дана модель враховує ймовірність відмов програмного забезпечення, а також використовує більш широкий набір математичних моделей безвідмовності елементів об'єкта.

**Ключові слова:** технічне обслуговування, плановий ремонт, дифузні розподіли, імітаційна модель.

## IMPROVED SIMULATION MODEL OF THE PROCESS OF MAINTENANCE AND REPAIR OF COMPLEX TECHNICAL OBJECT

G. Zhyrov, E. Lenkov

The paper suggests an improved simulation model of the process of maintenance and repair of complex technical object. The model is designed to predict the reliability and cost of the facility, taking into account the various maintenance strategies and planned repairs. In contrast to the well-known, this model takes into account the probability of software failures, but also uses a wide range of mathematical models of reliability of elements of the object.

**Keywords:** maintenance, scheduled maintenance, diffuse distribution, simulation model.