

УДК 681.5.033.2

к.т.н. Банзак Г.В. (ОГАТРК)

к.т.н. Банзак О.В. (ОГАТРК)

к.т.н., доц. Лещенко О.И. (ОГАТРК)

к.воен.н., доц. Пашков С.А. (ВИКНУ)

## РАЗРАБОТКА ОСНОВНОГО АЛГОРИТМА ИМИТАЦИОННОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

*В статье разработан основной алгоритм имитационной статистической модели «встроена» модель безотказности сложного технического объекта, за счет чего в модели реализована зависимость моделируемого процесса технического обслуживания от параметров конструктивной и надежностной структуры объекта. Правильность алгоритмов имитации процесса отказов-восстановлений проверялась путем сравнения результатов моделирования с точными расчетными значениями средней наработки на отказ, полученными для отдельно взятого элемента.*

**Ключевые слова:** техническое обслуживание, имитационная статистическая модель, календарь событий

**Вступление.** Сложные технические объекты в современном обществе имеют исключительно важное значение. Речь идет в первую очередь о различных радиоэлектронных комплексах военного и специального назначения, радиолокационных станциях, автоматизированных системах управления (воздушным движением, объектами энергетики и т.п.). Характерной особенностью сложных технических объектов специального назначения является наличие в их составе большого количества (десятки, сотни тысяч) разнотипных комплектующих элементов, которые имеют различный уровень надежности, различные закономерности процессов их износа и старения. Эта особенность требует более тонкого подхода к организации и планированию технического обслуживания (ТО) в процессе их эксплуатации.

Проблема заключается в том, что при разработке таких объектов все вопросы, связанные с ремонтпригодностью и техническим обслуживанием должны решаться уже на ранних этапах проектирования объекта.

“Всплеск” количества теоретических работ по вопросам ТО сложных систем приходится на 70-е годы прошлого века, что можно объяснить массовым производством в то время сложной радиоэлектронной аппаратуры военного и специального назначения [1,2,3,4]. В настоящее время наблюдается спад количества научных публикаций, посвященных вопросам ТО сложных технических объектов. Одной из причин этого, на наш взгляд, является резкое возрастание уровня интеграции и надежности комплектующих изделий. Благодаря этому разработчикам сложной техники удавалось решать вопросы обеспечения требуемого уровня безотказности без значительных затрат на ТО (или вообще без ТО). Однако та же причина (высокая интеграция и надежность комплектующих элементов) открыла возможность реализации все более сложной техники с новыми функциями, что при старой элементной базе было невозможно. Это вновь приводит объективно к проблемам обеспечения надежности и, следовательно, опять становится актуальным вопрос о необходимости ТО и выборе оптимальной стратегии его проведения.

К сожалению, известные в настоящее время математические модели и методики расчета оптимальных параметров процессов ТО мало пригодны для применения к реальным техническим объектам. Основной недостаток этих моделей заключается в том, что в них или вообще не учитывается сложная структура объекта, или имеется возможность учитывать только некоторые простейшие структуры [5,6].

**Основная часть.** Рассмотрим кратко работу алгоритма. Структурная схема алгоритма имитационной статистической модели представлена на рисунке 1.

Оператор 1 осуществляет ввод исходных данных.

Оператор 2 устанавливает начальные значения всех переменных, в которых будет накапливаться необходимая статистика. Устанавливается начальное значение переменной  $N_i$  – числа выполненных итераций моделирования. Одна итерация моделирования соответствует однократной имитации процесса эксплуатации объекта (процесса отказов-восстановлений и ТО) в течение заданного времени  $T_j$ .

Оператор 3 генерирует и сохраняет в календаре событий моменты времени первых событий.

Календарь событий имеет следующую структуру:

$$\{t_1, t_2, \dots, t_n, t_k, t_{to}\}, \quad (3.1)$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – случайные моменты времени первых отказов элементов объекта ( $n = |E_b|$  – число элементов объекта, отказы-восстановления которых будут моделироваться);

$t_k$  – время первого контроля ( $t_k = T_k$ );

$t_{to}$  – время первого ТО (способы и алгоритмы определения зависят от заданной стратегии проведения ТО).

Для генерирования случайных моментов времени отказов элементов  $t_i$  используется датчик случайных чисел, подчиняющийся  $DN$ -распределению [8,47]. Параметрами  $DN$ -распределения являются:  $T_{cpi}$  – математическое ожидание (параметр масштаба), и  $V_i$  – коэффициент вариации (параметр формы).

Если элемент является группой однотипных элементов, то для него формируется массив  $t\_mas$  размерностью  $n$ . В массив записываются  $n$  случайных реализаций величин, подчиненных одному и тому же  $DN$ -распределению с параметрами  $T_{cpi}$  и  $V_i$ . В качестве запланированного времени отказа группы принимается наименьшее из значений элементов массива  $t\_mas$ .

Запланированные моменты времени отказов элементов сохраняются в списке ListEu, в поле tE.t соответствующего объекта tE.

Время контроля  $t_k$  планируется только в режимах ТОС (при  $pr\_to = 1 \vee 2$ ). Время ТО  $t_{to}$  планируется только в режиме моделирования регламентированного ТО (при  $pr\_to = 3$ ).

Оператор 4 определяет текущее модельное время  $t$  путем поиска наименьшего значения в календаре событий:

$$t = \min \{t_1, t_2, \dots, t_n, t_k, t_{to}\},$$

и определяет тип текущего события.

Если найденное минимальное значение  $t$  является временем отказа одного из элементов, входящих в резервированную группу ( $TG = 2 \vee 3$ ), то признак отказа формируется только в том случае, если в резервированной группе отказал последний элемент. При отказе одного из элементов резервированной группы число оставшихся исправными элементов  $n\_r$  уменьшается на 1, вместо значения  $t$  в календаре событий записывается взятое из массива  $t\_mas$  время отказа следующего резервного элемента. После этого в календаре событий заново производится поиск минимального времени и определение соответствующего текущего события.

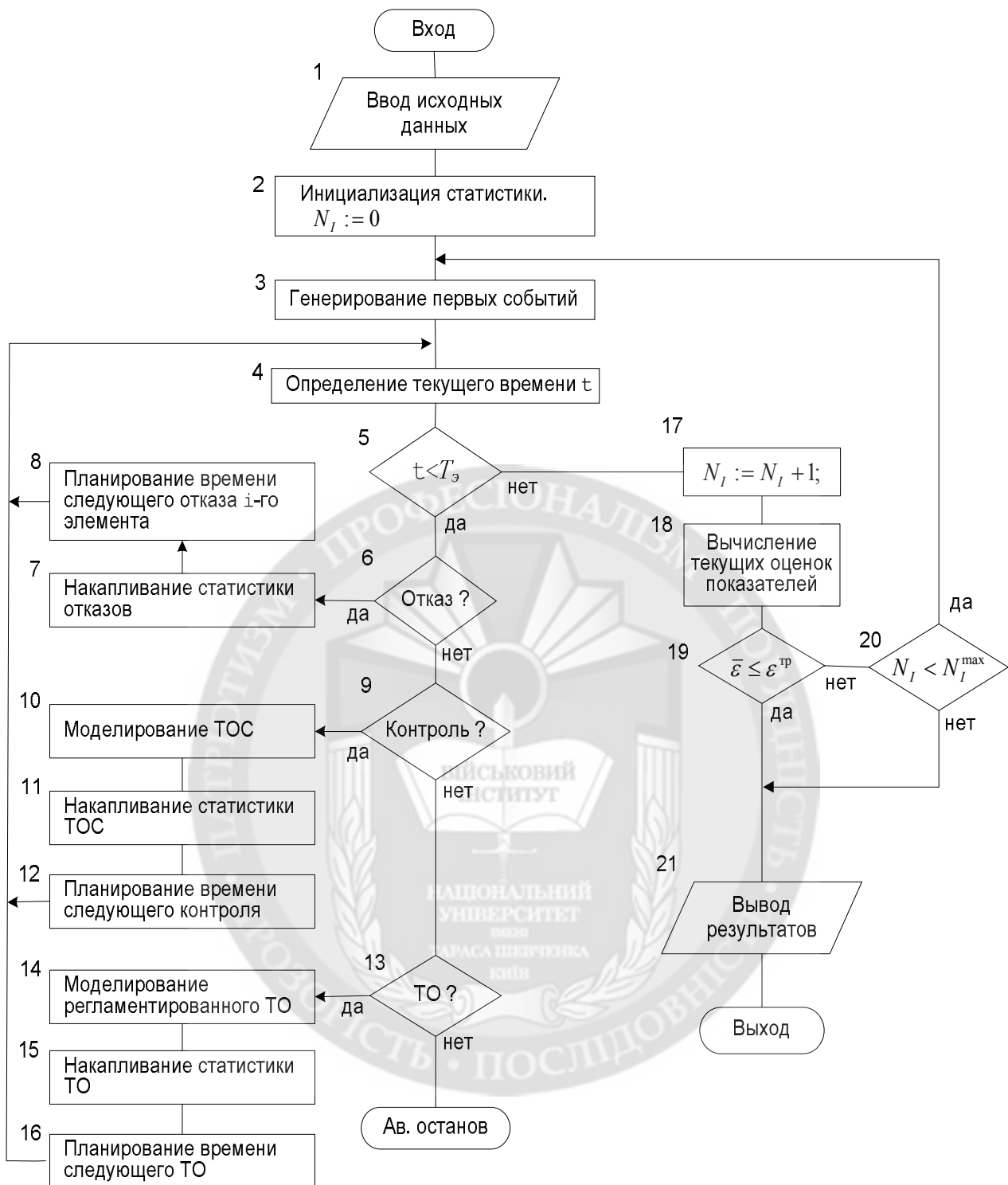


Рис. 3.3. Структурная схема алгоритма имитационной статистической модели

Оператор 5 проверяет условие завершения текущей итерации моделирования. Если  $t < T_g$ , то текущая итерация еще не завершилась, и далее выполняются операторы 6-15.

Оператор 6 проверяет, является ли текущее событие отказом. Если да, то выполняются операторы 7 и 8, которые обрабатывают это событие. Обработка события “отказ” заключается в накоплении статистики отказов и планировании времени следующего отказа  $i$ -го элемента.

Оператором 7 накапливается статистика:

$n_{отк\Sigma}$  - суммарное число отказов объекта;

$\tau_{в\Sigma}$  - суммарные затраты времени на восстановление объекта;

$C_{в\Sigma}$  - суммарные затраты стоимости на текущий ремонт (восстановление).

Накапливание статистики производится операторами:

$$n_{отк\Sigma} := n_{отк\Sigma} + 1;$$

$$\tau_{в\Sigma} := \tau_{в\Sigma} + \tau_{di} + \tau_{замi};$$

$$C_{в\Sigma} := C_{в\Sigma} + C_{di} + C_{замi}, \quad (2)$$

где  $\tau_{di}$  - среднее время диагностирования при отказе  $i$ -го элемента;

$\tau_{замi}$  - среднее время замены  $i$ -го элемента;

$C_{di}$  - стоимость диагностирования  $i$ -го элемента;

$C_{замi}$  - стоимость операции замены  $i$ -го элемента.

Здесь  $i$  – это номер отказавшего элемента, который определяется при выполнении оператора 4.

Планирование времени следующего отказа производится следующим оператором:

$$t_i := t + GEN\_DN(T_{срi}, v_i), \quad (3)$$

где  $t_i$  - новое запланированное время отказа  $i$ -го элемента;

$GEN\_DN(T_{срi}, v_i)$  - функция, возвращающая реализацию случайной величины, подчиненной  $DN$ -распределению с параметрами  $T_{срi}$  и  $v_i$ . Функция реализована в соответствии с алгоритмами, описанными в [7].

Прежнее значение  $t_i$  сохраняется в памяти в переменной  $t_{0i}$  (в поле  $tE.t0$ ).

Если отказавшим элементом была группа последовательно соединенных однотипных элементов ( $TG=1$ ), то планирование времени следующего отказа группы осуществляется следующим образом:

- генерируется новое значение случайной наработки до отказа с помощью функции  $GEN\_DN(T_{срi}, v_i)$  и полученное значение записывается в 0-й элемент массива  $t\_mas$ ;

- заново производится упорядочивание элементов массива по возрастанию их значений;

- в качестве запланированного времени отказа группы принимается наименьшее из значений в массиве  $t\_mas$  (значение  $t\_mas[0]$ ).

Если отказавшим элементом была резервированная группа ( $TG=2 \vee 3$ ), то планирование следующего отказа производится так же, как для одиночного элемента (так как в резервированной группе уже нет исправных элементов и восстановление работоспособности производится за счет одного нового элемента).

Если текущее событие является событием “контроль”, оператор 9 передает управление операторам 10-11. Оператор 10 моделирует проведение технического обслуживания «по состоянию» (ТОС). Теоретически возможна ситуация, когда при выполнении оператора 10 вообще не моделируется ТО. Это возможно в случае, если техническое состояние ни одного из обслуживаемых элементов не требует проведения ТО.

Оператор 11 накапливает статистику ТО:

$\tau_{то\Sigma}$  - суммарные затраты времени на проведение ТО;

$C_{то\Sigma}$  - суммарные затраты стоимости на ТО.

Статистика накапливается операторами:

$$\tau_{\text{то}\Sigma} := \tau_{\text{то}\Sigma} + \tau_{\text{то}}(t);$$

$$C_{\text{то}\Sigma} := C_{\text{то}\Sigma} + C_{\text{то}}(t), \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{то}}(t)$  и  $C_{\text{то}}(t)$  - продолжительность и стоимость текущего (выполненного) ТО. Величины  $\tau_{\text{то}}(t)$  и  $C_{\text{то}}(t)$  определяются при выполнении оператора 10 по формулам:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{то}}(t) &= \tau_{\text{д}} + \sum_{i \in E_{\text{то}}(t)} (\tau_{\text{то}i} + P_{\text{зам}i} \tau_{\text{зам}i}); \\ C_{\text{то}}(t) &= C_{\text{д}} + \sum_{i \in E_{\text{то}}(t)} (C_{\text{то}i} + P_{\text{зам}i} C_{\text{зам}i}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{д}}$  - продолжительность диагностирования при ТО;

$\tau_{\text{то}i}$  - продолжительность операции ТО  $i$ -го элемента;

$C_{\text{то}i}$  - стоимость операции ТО  $i$ -го элемента;

$P_{\text{зам}i}$  - вероятность того, что при ТО потребуется замена  $i$ -го элемента;

$E_{\text{то}}(t)$  - подмножество элементов, которые подвергаются ТО в текущий момент времени  $t$  ( $E_{\text{то}}(t) \subseteq E_{\text{то}} \subseteq E_{\text{в}}$ ).

Оператор 12 формирует и сохраняет в календаре событий время следующего контроля. Если задан режим ТОС с фиксированной периодичностью контроля, то время следующего контроля определяется оператором

$$t_{\text{к}} := t + T_{\text{к}}. \quad (6)$$

Если задан режим ТОС с адаптивным изменением периодичности контроля, то выполняется оператор

$$t_{\text{к}} := t + \tau_{\text{то}}(t). \quad (7)$$

Операторы 13-16 выполняются только в режиме регламентированного ТО (только в этом режиме планируется время  $t_{\text{то}}$ ). В случае регламентированного ТО с событием связывается указатель на вид ТО, которым определяются объем и периодичность ТО:

$$\langle E_{\text{то}j}, T_{\text{то}j} \rangle,$$

где  $E_{\text{то}j}$  - множество элементов, которые должны обновляться при ТО  $j$ -го вида;

$T_{\text{то}j}$  - периодичность ТО  $j$ -го вида.

Оператор 14 моделирует ТО  $j$ -го вида (имитирует обновление всех элементов из  $E_{\text{то}j}$ ).

Оператор 15 производит накопление статистики ТО (аналогично оператору 11).

Оператор 15 планирует время следующего ТО ТО  $j$ -го вида:

$$t_{\text{то}} := t + T_{\text{то}j}. \quad (8)$$

Если при выполнении оператора 5 оказывается, что  $t \geq T_{\text{г}}$ , это значит, что текущая итерация моделирования завершилась. Управление передается операторам 17-21. Оператор

17 подсчитывает число выполненных итераций  $N_I$ . Оператор 18 вычисляет текущие оценки результирующих показателей ( $T_0$ ,  $K_\Gamma$ ,  $K_{\text{ти}}$ ,  $c_{\text{уд}}$ ). Операторы 19, 20 обеспечивают завершение процесса моделирования. Оператор 19 проверяет условие достижения требуемой точности результатов моделирования (относительная ошибка оценки среднего числа отказов объекта  $\bar{\varepsilon}$  достигла требуемого значения  $\bar{\varepsilon}^{\text{тр}}$ ). Оператор 20 завершает процесс моделирования в случае, если заданная точность результатов моделирования не достигла заданного требования, но при этом достигнуто заданное ограничение на максимальное число выполненных итераций  $N_I^{\text{max}}$ .

Ниже приводятся выражения, по которым вычисляются статистические оценки результирующих показателей.

Средняя наработка на отказ

$$T_0 = \frac{T_3 \cdot N_I}{n_{\text{отк}\Sigma}}, \quad (9)$$

где  $n_{\text{отк}\Sigma}$  - накопленное суммарное число отказов.

Коэффициент готовности

$$K_\Gamma = \frac{T_3 N_I}{T_3 N_I + \tau_{\text{в}\Sigma}}, \quad (10)$$

где  $\tau_{\text{в}\Sigma}$  - накопленное суммарное время восстановления.

Коэффициент технического использования

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_3 N_I - \tau_{\text{в}\Sigma} - \tau_{\text{то}\Sigma}}{T_3 N_I}, \quad (11)$$

где  $\tau_{\text{то}\Sigma}$  - накопленное суммарное время ТО.

Удельная стоимость эксплуатации

$$c_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{в}\Sigma} + C_{\text{к}\Sigma} + C_{\text{то}\Sigma}}{T_3 N_I}, \quad (12)$$

где  $C_{\text{в}\Sigma}$ ,  $C_{\text{к}\Sigma}$  и  $C_{\text{то}\Sigma}$  - накопленные суммарные затраты стоимости на текущий ремонт (восстановление), контроль и ТО.

Нетрудно видеть, что базовой статистикой, влияющей на точность получаемых оценок показателей (9)-(12), является число отказов объекта. Поэтому целесообразно в качестве критерия остановки процесса моделирования принять относительную ошибку оценки числа отказов объекта в течение заданного периода эксплуатации. Оценки математического ожидания и дисперсии числа отказов объекта можно рассчитать следующим образом:

$$M[n_{\text{отк}}] = \bar{n}_{\text{отк}} = \frac{1}{N_I} \sum_{j=1}^{N_I} n_{\text{отк}j},$$

$$D[n_{\text{отк}}] = \frac{1}{N_I} \sum_{j=1}^{N_I} n_{\text{отк}j}^2 - (\bar{n}_{\text{отк}})^2, \quad (13)$$

где  $n_{\text{отк}j}$  - число отказов объекта в  $j$ -ой итерации моделирования ( $j = \overline{2, N_I}$ );

$\bar{n}_{\text{отк}}$  - среднее число отказов объекта в течение одной итерации моделирования.

При достаточно большом объеме статистики можно считать, что случайная величина  $\bar{n}_{\text{отк}}$  подчинена нормальному закону распределения. С учетом этого относительную ошибку оценки  $\bar{n}_{\text{отк}}$  можно определить как величину

$$\varepsilon = z_{\alpha} \sqrt{D[n_{\text{отк}}]} / \bar{n}_{\text{отк}}, \quad (14)$$

где  $z_{\alpha}$  - квантиль нормированного нормального распределения для вероятности  $1 - \alpha$  (для  $\alpha = 0,05$   $z_{\alpha} = 1,96$  [48,49]).

Согласно (11) величина  $\varepsilon$  - это половинный 95-процентный доверительный интервал для относительной ошибки оценки среднего числа отказов  $\bar{n}_{\text{отк}}$ :

$$\text{Вер} \left\{ 1 - \varepsilon < \frac{\bar{n}_{\text{отк}}}{\tilde{n}_{\text{отк}}} < 1 + \varepsilon \right\} = 0,95, \quad (15)$$

где  $\tilde{n}_{\text{отк}}$  - неизвестное истинное значение среднего числа отказов (генеральное среднее).

Рассмотренный алгоритм реализован программно в системе программирования Delphi.

Алгоритм назван общим, так как определяет общую структуру процесса моделирования.

**Выводы.** По полученным результатам можно сделать такие выводы:

1. В алгоритмы ИСМ «встроена» МБ сложного технического объекта, за счет чего в модели реализована зависимость моделируемого процесса ТО от параметров конструктивной и надежностной структуры объекта. Перед началом моделирования пользователь должен задать подмножество восстанавливаемых и потенциально обслуживаемых элементов путем их выбора (маркирования) в дереве конструктивной структуры объекта. Генерирование случайных значений наработки до отказа отдельных элементов, подчиненных  $DN$ -распределению, осуществляется с помощью датчика случайных чисел, разработанного в [7].

2. Верификация ИСМ производилась следующим образом. Правильность алгоритмов имитации процесса отказов-восстановлений проверялась путем сравнения результатов моделирования с точными расчетными значениями средней наработки на отказ, полученными для отдельно взятого элемента. Полученная таким способом инструментальная точность модели, оцениваемая величиной относительной ошибки, составила менее 1%. Правильность алгоритмов имитации процессов ТО проверялась качественно (по непротиворечивости получаемых результатов моделирования).

Методическая точность ИСМ определяется такими факторами:

- исходной надежностью объекта (заданными показателями надежности элементов);
- числом реализаций (продолжительностью) моделирования;
- заданной продолжительностью эксплуатации объекта.

Из указанных факторов наиболее существенным является первый. В большинстве практически интересных случаев относительная ошибка результатов моделирования не превышает 10-20%.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
2. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Сов. радио, 1971. – 272 с.
3. Байхельт Ф., Франкин П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь, 1988. 198 с.
4. Степанов С.В. Профилактические работы и сроки их проведения. – М.: Сов. радио, 1972.
5. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
6. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Т.8. Эксплуатация и ремонт. М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
7. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

**Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В.,** начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**к.т.н. Банзак Г.В., к.т.н. Банзак О.В., к.т.н., доц Лещенко О.І., к.військ.н., доц. Пашков С.О.**  
**РОЗРОБКА ОСНОВНОГО АЛГОРИТМУ ІМІТАЦІЙНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ МОДЕЛІ**  
**ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ**

*У статті розроблено основний алгоритм імітаційної статистичної моделі «вбудована» модель безвідмовності складного технічного об'єкта, за рахунок чого у моделі реалізована залежність модельованого процесу технічного обслуговування від параметрів конструктивної і надійності структури об'єкта. Правильність алгоритмів імітації процесу відмов-відновлень перевірялася шляхом порівняння результатів моделювання з точними розрахунковими значеннями середнього напрацювання на відмову, отриманими для окремо взятого елемента.*

**Ключові слова:** *технічне обслуговування, імітаційна статистична модель, календар подій*

**Ph.D. Banzak G.V., Ph.D. Banzak O.V., Ph.D. Leshenko O.I., Ph.D. Pashkov S.A.**  
**DEVELOPMENT OF BASIC STATISTICAL MODEL ALGORITHM SIMULATION**  
**PROCESS MAINTENANCE**

*In clause the basic algorithm of imitating statistical model is developed "is built in" model of non-failure operation of complex technical object due to what in model dependence of modeled process of maintenance service on parameters constructive and reliability structures of object is realized. Correctness algorithms of imitation process of refusals-restoration was checked by comparison of results of modeling with the exact settlement values of the average time between failures received for separately taken element.*

**Keywords:** *maintenance service, imitating statistical model, calendar of events*