

УДК 681.3(07)

С.В. Ленков<sup>1</sup>, К.Ф. Боряк<sup>2</sup>, С.А. Пашков<sup>1</sup>, О.В. Банзак<sup>3</sup><sup>1</sup> Военный институт Киевского национального университета имени Т. Шевченко, Киев<sup>2</sup> Одесская государственная академия технического регулирования и качества, Одесса<sup>3</sup> Одесский политехнический университет, Одесса

## ИМИТАЦИОННАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В статье рассматриваются алгоритмы, положенные в основу имитационной статистической модели процессов технического обслуживания (ТО) сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ). Модель предназначена для исследования зависимости показателей надежности и стоимости эксплуатации от параметров самого объекта и от параметров выбранной стратегии ТО. Рассмотренные алгоритмы дают полное представление о принятых в модели приемах и способах моделирования ТО. Модель реализована программно средствами системы программирования Delphi.

**Ключевые слова:** статистическая модель, алгоритмы, моделирования технического обслуживания.

### Введение

Техническое обслуживание (ТО), как известно, является важным средством обеспечения требуемого уровня надежности сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ) на этапе эксплуатации [1]. Возможности эффективного осуществления ТО должны быть заложены на этапе создания объекта РЭТ, так как в аппаратуру объекта должны быть встроены необходимые для этого элементы систем контроля и диагностирования технического состояния (ТС) объекта. Поэтому представляется весьма важным иметь математическую модель, с помощью которой можно было бы исследовать зависимость показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта от параметров системы ТО, предусмотренной для данного типа объектов.

Наиболее известны два подхода (принципа) проведения ТО: «ТО по ресурсу» (ТОР) и «ТО по состоянию» (ТОС). Согласно принципу ТОР в процессе эксплуатации осуществляется контроль текущего ресурса (наработки) объекта, и в случае, если ресурс, выработанный после предыдущего ТО, достиг заданного ограничения, проводится очередное ТО. При ТОР контроль ТС объекта, как правило, не проводится, просто выполняются предписанные работы в установленном объеме. Принцип ТОС заключается в том, что в процессе эксплуатации осуществляется контроль текущего ТС, и ТО проводится в случае, если ТС объекта ухудшается до некоторого заданного предельно допустимого уровня. Очевидно, что для реализации принципа ТОС необходимо, чтобы для обслуживаемых элементов объекта имелись измеряемые определяющие параметры, по значению которых можно было бы определить ТС элементов.

Сложность процессов ТО не позволила разработать для них удовлетворительную аналитическую модель, поэтому для построения модели был выбран

метод имитационного статистического моделирования [2].

Потенциально наиболее эффективными являются стратегии ТОС, так как они используют информацию о фактическом ТС объекта. Однако очевидно, что для реализации стратегий ТОС всегда требуются дополнительные затраты (стоимости, веса, объема) и на практике не всегда стратегии ТОС оказываются эффективнее стратегии ТОР. Разработанная имитационная статистическая модель (ИСМ) позволяет осуществлять сравнение различных стратегий ТО по их эффективности и выбирать наилучшую из них.

Ниже рассматриваются алгоритмы, реализующие данную ИСМ. В начале кратко описывается основной алгоритм, описывающий общую структуру процесса моделирования, затем подробно рассматриваются алгоритм, реализующий моделирование стратегии ТОС с постоянной периодичностью контроля.

### Структурная схема основного алгоритма

В модели воспроизводится (имитируется) процесс, структура которого описывается графом состояний и переходов, изображенным на рис. 1. Явно имитируются два типа событий: «отказ» (переход  $0 \rightarrow 1$ ) и «ТО» (переход  $0 \rightarrow 2$ ). После отказа сразу начинается процесс восстановления (текущий ремонт) объекта. События «восстановление» (переход  $1 \rightarrow 0$ ) и «завершение ТО» (переход  $2 \rightarrow 0$ ) имитируются неявно, путем выполнения определенных действий при обработке этих событий.

События «отказ» имитируются для всех отказывающих элементов (элементов, включенных в структурную схему надежности объекта). Обработка события «отказ» заключается в генерировании нового случайного значения наработки до отказа и запоминании времени следующего отказа в календаре

событий (КС). Одновременно осуществляется накопление статистики об отказах и времени нахождения объекта в работоспособном состоянии.

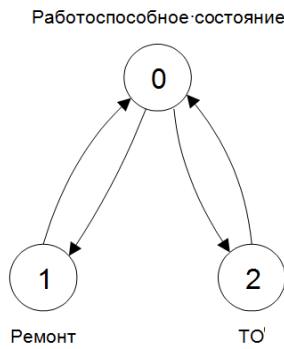


Рис. 1. Граф состояний и переходов моделируемого процесса

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

Обработка события «ТО» заключается в перепланировании в КС моментов времени следующих отказов для всех элементов, для которых моделируется ТО. Этим имитируется обновление обслуживаемых элементов. Одновременно накапливается статистика о продолжительности и стоимости ТО.

Основной алгоритм, как уже отмечалось, определяет общую структуру процесса вычислений в ИСМ, которая остается неизменной в различных режимах моделирования. Укрупненная структурная схема основного алгоритма моделирования изображена на рис. 2. Рассмотрим кратко работу алгоритма.

Оператор 1 осуществляет ввод исходных данных. Информация вводится из базы данных (БД) модели и преобразуется в оперативной памяти к виду, необходимому для моделирования.

Оператор 2 устанавливает начальные значения всех переменных, в которых будет накапливаться необходимая статистика. Устанавливается начальное значение переменной  $N_I$  – числа выполненных итераций моделирования.

Оператор 3 генерирует и сохраняет в КС моменты времени первых событий. КС – это специальная область памяти, в которой запоминаются и модифицируются в процессе моделирования моменты времени всех моделируемых событий. Для генерирования моментов времени отказов элементов объекта используется датчик случайных чисел, подчиненных диффузионному немонотонному распределению (*DN*-распределению) [3]. Это распределение считается наиболее адекватной моделью отказов, как для радиоэлектронных, так и для электромеханических элементов [4].

Оператор 4 определяет текущее модельное время  $t$ , которое определяется как наименьшее значение, найденное в КС.

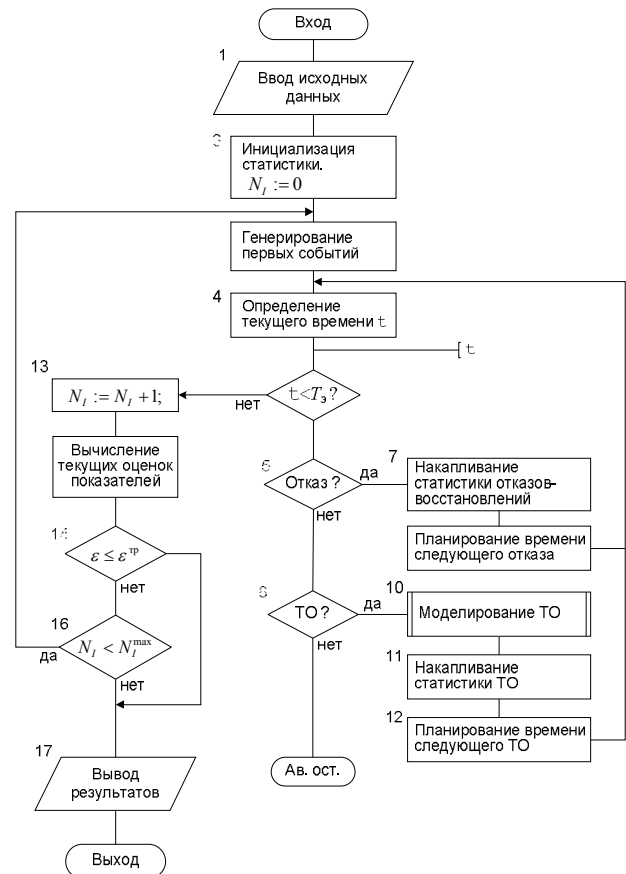


Рис. 2. Структурная схема алгоритма имитационной статистической модели

Оператор 5 проверяет условие завершения текущей итерации моделирования. Если время  $t$  не вышло за пределы заданного периода эксплуатации  $T_3$  ( $t < T_3$ ), то это означает, что текущая итерация еще не завершилась. В этом случае далее выполняются операторы 6-12, осуществляющие обработку текущего события. Операторы 6-8 осуществляют обработку события «отказ». Операторы 9-12 осуществляют обработку события «ТО». После этого управление возвращается оператору 4 для поиска в КС момента времени следующего события.

Если при выполнении оператора 5 выяснилось, что текущая итерация моделирования завершилась ( $t \geq T_3$ ), то управление передается операторам 13-17. Оператор 13 подсчитывает число выполненных итераций  $N_I$ . Оператор 14 вычисляет текущие оценки результирующих показателей. Операторы 15, 16 обеспечивают завершение процесса моделирования (здесь  $\epsilon$  – относительная ошибка оценки среднего числа отказов объекта;  $\epsilon^{TP}$  – допустимое значение ошибки;  $N_I^{max}$  – заданное ограничение на число итераций моделирования).

Результатами моделирования являются оценки следующих показателей:

- $T_o$  – средняя наработка на отказ объекта;
- $T_B$  – среднее время восстановления;

$K_r$  – коэффициент готовности;

$K_{тн}$  – коэффициент технического использования;

$c_э$  – удельная стоимость эксплуатации объекта.

Далее рассматриваются алгоритм моделирования ТО (алгоритм, реализующий оператор 10 основного алгоритма) для стратегии ТОС с постоянной периодичностью контроля.

### Моделирование процесса ТОС с постоянной периодичностью контроля

Формализованное описание моделируемого процесса. В случае стратегии ТОС с постоянной периодичностью контроля в момент контроля производится измерение определяющих параметров всех элементов, потенциально подлежащих обслуживанию. Если измеренное значение определяющего параметра  $u_i(t)$  превышает заданное значение уровня ТО  $u_{тоi}$ , производится обновление (замена)  $i$ -го элемента.

Ранее уже говорилось, что для моделирования отказов элементов используется вероятностно-физическая (ВФ) модель отказов ( $DN$ -распределение) [4]. Основываясь на свойстве «физичности» данной модели, каждый отказ можно интерпретировать как событие, заключающееся в выходе определяющего параметра элемента за допустимые пределы. На рис. 3 изображены в одном масштабе времени (наработки) плотность вероятности  $DN$ -распределения  $f_i(t)$  и связанные с ней графики случайных процессов деградации нормированного значения определяющего параметра  $u_i(t)$  (предельно допустимое значение нормированного определяющего параметра  $u_i(t)$  равно 1).

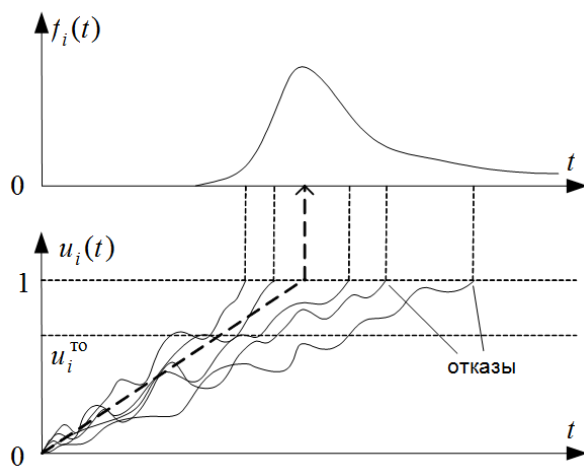


Рис. 3. Процесс деградации определяющего параметра

Если предположить, что средний ресурс элемента линейно убывает во времени (такое допущение положено в основу ВФ-модели), то величина среднего остаточного ресурса в произвольный момент времени  $t$  равна

$$\bar{R}_i(t) = T_{срi} - t, \quad (1)$$

где  $T_{срi}$  – средняя наработка до отказа  $i$ -го элемента.

В процессе моделирования запланированные случайные моменты времени отказов элементов нам известны. Если отказ  $i$ -го элемента запланирован на момент времени  $t_i > t$ , то его остаточный ресурс в момент времени  $t$  равен

$$R_i(t) = t_i - t. \quad (2)$$

Величина  $R_i(t)$  здесь является случайной реализацией остаточного ресурса. Случайному остаточному ресурсу  $R_i(t)$  можно поставить в соответствие случайное значение нормированного определяющего параметра  $u_i(t)$ , величину которого можно определить следующим образом:

$$u_i(t) = 1 - \frac{R_i(t)}{R_{0i}}, \quad (3)$$

где  $R_{0i}$  – случайная реализация полного ресурса  $i$ -го элемента, величина которого равна

$$R_{0i} = t_i - t_{0i}. \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) вместо (3) можно записать:

$$u_i(t) = (t - t_{0i}) / (t_i - t_{0i}), \quad (5)$$

где  $t$  – текущее время контроля;  $t_{0i}$  – время последнего обновления  $i$ -го элемента;  $t_i$  – запланированное (модельное) время отказа  $i$ -го элемента.

Величина  $u_i(t)$  принимается за измеренное в момент времени  $t$  значение определяющего параметра. Решение о необходимости ТО для  $i$ -го элемента принимается по критерию  $u_i(t) \geq u_{тоi}$ . С учетом (5) этот критерий представляется неравенством:

$$t \geq t_{0i} + u_{тоi}(t_i - t_{0i}). \quad (6)$$

Таким образом, в процессе моделирования в момент контроля  $t$  необходимо для каждого обслуживаемого элемента проверить выполнение условия (6), и если это условие выполняется, имитировать его ТО (обновление). Имитация ТО должна включать:

- 1) генерирование нового случайного значения времени отказа элемента  $t_i$ ;
- 2) время последнего обновления  $i$ -го элемента  $t_{0i}$  сделать равным текущему времени  $t$ .

**Алгоритм моделирования.** Структурная схема алгоритма моделирования процесса ТОС с постоянной периодичностью контроля (процедура Modelir\_TOC) изображена на рис. 4. Данный алгоритм, как и вся ИСМ, реализован в системе программирования Delphi [5]. Обозначения переменных будем вводить и объяснять по мере рассмотрения структурной схемы алгоритма.

В момент вызова алгоритма (в момент модельного времени  $t$ ) все данные, которые им используются, находятся в оперативной памяти (ОП).

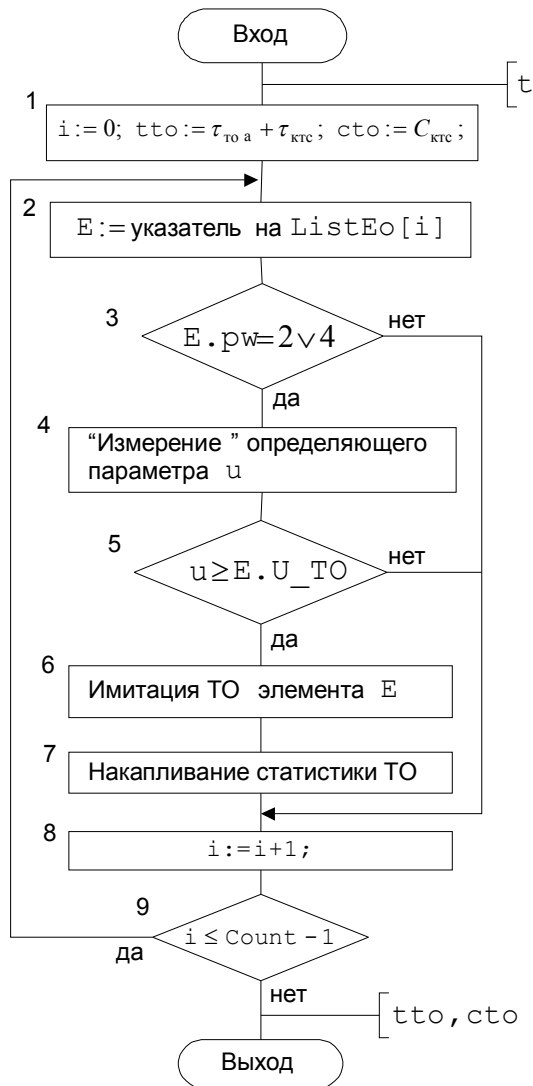


Рис. 4. Алгоритм процедуры Modelir\_TOC

Оператор 1 выполняет подготовительные операции, устанавливает начальные значения переменных:

$i$  - параметр цикла, в котором будет осуществляться перебор всех элементов  $e_i \in E_0$ , где  $E_0$  - множество отказывающих элементов объекта РЭТ. В ОП множество представлено списком ListEo, который создан как экземпляр класса типа tList [5]. Элементами списка ListEo являются указатели (ссылки) на данные, описывающие соответствующие конструктивные элементы объекта;

$tto$  и  $cto$  - переменные, в которых будут накапливаться значения продолжительности и стоимости ТО (результатирующая информация процедуры).

Оператор 2 формирует указатель  $E$  на данные, относящиеся к текущему элементу  $e_i$  (для простоты будем говорить «элемент  $E$ »).

Оператор 3 проверяет, является ли элемент  $E$  обслуживаемым. Признаком обслуживаемости элемента  $E$  является условие  $E.pw = 2 \wedge 4$  (назначение переменной  $E.pw$  здесь пояснять не будем). Если элемент обслуживаемый, то выполняются операторы 4-7.

Оператор 4 имитирует измерение определяющего параметра  $u_i(t)$  в соответствии с выражением (5). Программно осуществляются следующие действия:

$$R0 := E.t - E.t0;$$

$$R := E.t - t;$$

$$u := 1 - R/R0,$$

где  $u$  - переменная, в которой формируется измененное значение определяющего параметра;  $R$  и  $R0$  - переменные, соответствующие полному и остаточному ресурсу элемента  $E$  (программная реализация соответствующих обозначений  $R_i(t)$  и  $R_{0i}$  в (3)).

Оператор 5 проверяет выполнение критерия  $u_i(t) \geq u_{тоi}$ :  $u \geq E.U\_TO$ .

Оператор 6 имитирует выполнение ТО (обновление элемента  $E$ ) путем исполнения следующих инструкций:

$$E.t0 := t;$$

$$E.t := t + E.Gener_otkaz(z), \quad (7)$$

где  $E.Gener_otkaz(z)$  - процедура, с помощью которой генерируется случайное время до отказа элемента  $E$ .

Оператор 7 осуществляет накапливание данных в переменных  $tto$  и  $cto$ :

$$tto := tto + E.t\_to + E.p\_to * E.t\_zam;$$

$$cto := cto + E.c\_to + E.p\_to * (E.c0 + E.c\_zam).$$

Операторы 8 и 9 обеспечивают циклическое выполнение операторов 4-7 для всех обслуживаемых элементов из списка ListEo. Как только параметр цикла  $i$  выйдет за пределы диапазона индексов элементов списка ListEo ( $i > ListEo.Count - 1$ ), оператор 9 завершит выполнение цикла. В переменных  $tto$  и  $cto$ , которые являются параметрами процедуры, будут сформированы значения продолжительности и стоимости выполненного ТО.

## Выводы

Рассмотренные алгоритмы дают полное представление о способе моделирования ТО методом имитационного статистического моделирования. Алгоритмы моделирования ТО для других стратегий ТО можно найти в [6,7]. Все алгоритмы реализованы в среде программирования Delphi и проверены на различных примерах исходных данных.

## Список литературы

1. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введ. с 01.01.1980.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. - М.: Наука, 1978. - 400 с.
3. Федухин А.В. К вопросу о статистическом моделировании надежности / А.В. Федухин, Н.В. Сеспедес-Гарсия // Математические машины и системы. - 2006. - № 1. - С. 156 - 163.
4. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. - Введ. 01.01.99. - 45 с.

5. Дарахвелидзе П.Г. Программирование в Delphi 7 / П.Г. Дарахвелидзе, Е.П. Марков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 784 с.

6. Имитационное статистическое моделирование процессов технического обслуживания и ремонта сложных объектов РЭТ: модели и оптимизация [монография] / С.В. Ленков, В.О. Браун, В.А. Осыпа и др.; под ред. С.В. Ленкова. – Николаев : Сент-Гросс, 2013. – 244 с.

7. Прогнозування надійності складних об'єктів радіоелектронної техніки та оптимізація параметрів їх

експлуатації імітаційних статистичних моделей [монографія] / [С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун]; под. ред. С.В. Ленкова. – Одеса: ВМВ, 2014 – 248 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ІМІТАЦІЙНА СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, С.О. Пашков, О.В. Банзак

У статті розглядаються алгоритми, покладені в основу імітаційної статистичної моделі процесів технічного обслуговування (ТО) складних об'єктів радіоелектронної техніки (РЕТ). Модель призначена для дослідження залежності показників надійності і вартості експлуатації від параметрів самого об'єкту і від параметрів вибраної стратегії ТЕ. Розглянуті алгоритми дають повне уявлення про прийняті в моделі прийоми і способи моделювання ТЕ. Модель реалізована програмно засобами системи програмування Delphi.

**Ключові слова:** статистична модель, алгоритми, моделювання технічного обслуговування.

### SIMULATION MODEL OF STATISTICAL SERVICE RADIO ELECTRONICS COMPLEX OBJECTS

S.V. Lenkov, K.F. Boryak, S.O. Pashkov, O.V. Banzak

This article discusses the algorithms underlying the simulation of statistical process model maintenance (MT) complex objects radio electronic technique (RET). The model is designed to investigate the dependence of indicators of reliability and cost of operation on the parameters of the object and the parameters of the chosen strategy MT. The algorithms to provide a complete representation of the model adopted in the methods and modeling techniques MT. model implemented software system means programming Delphi.

**Keywords:** statistical models, algorithms, modeling maintenance.