

# ФОРМАЛИЗОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АДАПТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ СЛОЖНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Е.С. Ленков<sup>1</sup>, Г.Б. Жиров<sup>2</sup>, Т.В. Бондаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военный институт телекоммуникаций и информатизации,  
ул. Московская, 45/1, 01011, г. Киев, Украина; e-mail: lenkov\_s@ukr.net

<sup>2</sup> Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,  
ул. Ломоносова, 81, 03189, г. Киев, Украина

В статье предложена математическая модель процесса технического обслуживания сложного технического объекта. Параметрами модели являются параметры технического обслуживания. Модель предназначена для построения имитационной модели процесса технического обслуживания и ремонта с целью прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта с учетом проведения различных стратегий технического обслуживания и плановых ремонтов.

**Ключевые слова:** математическая модель, техническое обслуживание, диффузные распределения, имитационная модель, стратегия адаптивного обслуживания по состоянию

## Введение и постановка задачи

Эксплуатация сложных современных технических объектов, таких, например, как объекты радиоэлектронной техники (РЭТ), невозможна без качественно налаженной системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Такая система необходима как для обеспечения требуемого уровня надежности данных объектов, так и для продления их ресурса. Необходимость проведения технического обслуживания (ТО) заключается в своевременной замене элементов, которые находятся в предотказовом состоянии, а ремонт проводится с целью восстановления исправного или работоспособного состояния объекта, а также восстановления ресурса всего объекта или его части [1, 2].

Показатели надежности и стоимости эксплуатации объектов РЭТ зависят как от свойств безотказности и ремонтпригодности самого объектов, так и от параметров процесса проведения ТОиР. Для того чтобы иметь возможность оптимизировать характеристики объекта (на этапе его разработки), а также параметры системы ТОиР, необходимо предварительно построить модели, которые устанавливали бы связь между параметрами объекта, системы и прогнозируемыми показателями надежности и стоимости эксплуатации объекта РЭТ.

На сегодняшний день, в зависимости от критерия, который используется при определении сроков проведения ТО, существуют две основные стратегии организации проведения ТО: ТО “по ресурсу” (ТОР) и ТО “по состоянию” (ТОС) [3-6].

При проведении ТО “по ресурсу” осуществляется контроль за текущим ресурсом (наработкой) объекта, и в случае, если остаточный ресурс (остаточная наработка) снижается до некоторого заданного предельного значения, производятся работы по его ТО. При ТО “по состоянию” осуществляется контроль за текущим техническим

состоянием объекта, и ТО проводится в случае, если техническое состояние объекта ухудшается до некоторого заданного недопустимого уровня. В свою очередь, при проведении ТОС можно выделить 2 стратегии: ТОС с постоянной периодичностью контроля и ТОС с переменной периодичностью контроля (адаптивное ТОС);

В статье решается задача построения формализованной модели процесса технического обслуживания сложного технического объекта при выборе стратегии адаптивного ТО по состоянию.

## Результаты исследования

Сущность стратегии адаптивного ТО по состоянию состоит в том, что расчет периодов проведения контроля технического состояния (КТС) производится при проведении очередного ТО с учетом статистических данных всех предыдущих ТО, расчет предварительного времени следующего ТО производится также при текущем ТО и уточняется в процессе эксплуатации при проведении КТС. Очевидное преимущество адаптивного КТС состоит в том, что для двух объектов, техническое состояние (ТС) которых разное, периоды проведения контроля ТС должно быть также разным. Периоды времени между КТС для объекта, показатели которого лучше, должны быть больше, чем для второго объекта. Будем полагать [1], что ТС объекта определяется ТС его элементов, а для определения ТС элемента будем использовать понятие определяющий параметр.

В качестве моделей отказов элементов будем использовать вероятностно-физические модели, а именно: для отказов электро-радиокомпонентов –  $DN$ -распределение, механических элементов –  $DM$ -распределение [7]. В качестве основной характеристики определяющего параметра  $i$ -го элемента –  $u_i(t)$ , берем среднюю скорость деградации этого параметра –  $a_i(t)$ , измеренную в момент времени  $t$ :

$$a_i(t_k) = \frac{u_i(t_k) - u_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \quad (1)$$

где  $u_i(t_k)$  и  $u_i(t_{k-1})$  - нормированные значения определяющего параметра  $i$ -го элемента в моменты времени  $t_k$  и  $t_{k-1}$  соответственно;

$t_{k-1}$  – момент времени последнего КТС, при котором определялось значение определяющего параметра  $i$ -го элемента или производилось его обновление (замена);

$i = \overline{1, |E_0|}$ ,  $E_0$  – множество всех конструктивных элементов, которые входят в структурную схему надежности объекта,  $|E_0|$  – количество элементов множества  $E_0$ .

Нормированные значения определяющего параметра вычисляются по известной формуле [1]:

$$u_i(t) = \frac{|x_i(t) - x^0|}{|x_i^{don} - x^0|},$$

где  $x_i(t)$  - значение определяющего параметра, измеренное в момент времени  $t$ ;

$x^0$  - исходное (номинальное) значение определяющего параметра;

$x_i^{don}$  – предельно допустимое значение определяющего параметра, при достижении которого возникает отказ.

Соответственно, если  $u_i(t) = 0$  - элемент полностью исправен, а если  $u_i(t) = 1$  – в

элементе возникает отказ. Техническое обслуживание необходимо проводить при приближении определяющих параметров  $u_i(t)$  к граничному состоянию. Исходя из вышеизложенного, можно найти нормированное значение определяющего параметра, при достижении которого требуется проведение ТО:

$$u_i^{TO}(t) = \frac{|x_i^{TO}(t) - x^0|}{|x_i^{don} - x^0|},$$

где  $x_i^{TO}(t)$  – значение определяющего параметра, при достижении которого необходимо проведение ТО;  $x_i^{TO}(t) < x_i^{don}(t)$  и, следовательно  $u_i^{TO}(t) < 1$ .

Обновление элемента происходит при его восстановлении после отказа или при выполнении операций по его ТО. Далее будем полагать, что как при восстановлении, так и при проведении ТО происходит полное обновление элемента, следовательно, в (1)  $u_i(t_{k-1}) = 0$ .

Так как нами рассматриваются сложные технические объекты, предполагается наличие у них встроенной автоматической системы технического диагностирования (АСТД), средствами которой осуществляется измерение определяющих параметров  $u_i(t_k)$ , вычисление оценки средней скорости деградации параметров  $\tilde{a}_i(t_k)$  и сохранение этих оценок в долговременной памяти системы. Прогнозирование оценки средней скорости деградации можно проводить с использованием одной из перечисленных ниже моделей прогнозирования временных рядов: регрессионная модель; авторегрессионные модели (ARIMAX, GARCH, ARDLM); модели экспоненциального сглаживания (ES); модель по выборке максимального подобия (MMSP); модель на нейронных сетях (ANN); модель на цепях Маркова (Markov chains); модель на классификационно-регрессионных деревьях (CART); модель на основе генетического алгоритма (GA); модель на опорных векторах (SVM); модель на основе передаточных функций (TF); модель на нечеткой логике (FL). В статье предлагается использовать модели экспоненциального сглаживания, достоинством которых есть простота моделирования; единообразие анализа и проектирования, а недостаток модели - недостаточная гибкость и узкая применимость моделей. Из трех основных моделей предлагается использовать, в отличие от [1,8], не простое экспоненциальное сглаживание, а двухпараметрическое и трехпараметрическое экспоненциальное сглаживание.

Таким образом, можно предложить следующую методику по прогнозированию времени проведения ТО для стратегии адаптивного ТО по состоянию.

1. Определяем множество  $E_0$  – конструктивных элементов, которые входят в структурную схему надежности объекта, а система АСТД имеет возможность измерять их определяющие параметры.

2. Определяем скорость деградации элементов из множества  $E_0$  в момент времени проведения КТС,  $t_k$  – время проведения  $k$ -го КТС:

$$a_i(t_k) = \frac{u_i(t_k) - u_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}. \quad (2)$$

3. Прогнозируем скорость деградации элементов объекта для момента времени проведения следующего КТС,  $t_{k+1}$  – время проведения  $k+1$ -го КТС:

3.1. Оценка средней скорости деградации – модель двухпараметрического экспоненциального сглаживания:

$$\tilde{a}_i(t_{k+1}) = L(t_k) + T(t_k), \quad (3)$$

где  $L(t_k)$  - сглаженная величина на текущее время контроля  $t_k$ ;

$T(t_k)$  - значение тренда на текущее время

$$\begin{aligned} L(t_k) &= \alpha \cdot a_i(t_k) + (1 - \alpha)[S(t_{k-1}) - T(t_{k-1})], \\ T(t_k) &= \beta(S(t_k) - S(t_{k-1})) + (1 - \beta) \cdot T(t_{k-1}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент сглаживания ряда;

$\beta$  – коэффициент сглаживания тренда;  $\alpha, \beta \in (0,1)$ .

Если есть необходимость прогнозирования скорости деградации элементов объекта для момента времени проведения  $k+l$ -го КТС, используется следующее выражение:

$$\tilde{a}_i(t_{k+l}) = L(t_k) + l \times T(t_k).$$

3.2. Оценка средней скорости деградации – модель трехпараметрического экспоненциального сглаживания:

$$\tilde{a}_i(t_{k+l}) = [L(t_k) + T(t_k)] \times S(t_{k+l-s}), \quad (5)$$

$S(t_k)$  - значение сезонности на текущий момент времени (за предыдущий период),  $s$  - период сезонности (для квартальных изменений  $s = 4$ , для ежемесячных  $s = 12$ ). При проведении ТО наиболее информативными могут быть изменения полугодовые  $s = 2$  или сезонные  $s = 4$ .

$$\begin{aligned} L(t_k) &= \alpha \cdot \frac{a_i(t_k)}{S(t_{k-s})} + (1 - \alpha)[S(t_{k-1}) - T(t_{k-1})], \\ T(t_k) &= \beta(S(t_k) - S(t_{k-1})) + (1 - \beta) \cdot T(t_{k-1}), \\ S(t_k) &= \gamma \cdot \frac{a_i(t_k)}{L(t_k)} + (1 - \gamma) \cdot S(t_{k-s}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\gamma$  – коэффициент сглаживания сезонности;

$S(t_{k-s})$  – коэффициент сезонности за этот же период в предыдущем сезоне.

Если есть необходимость прогнозирования скорости деградации элементов объекта для момента времени проведения  $k+l$ -го КТС, используется следующее выражение:

$$\tilde{a}_i(t_{k+l}) = [L(t_k) + T(t_k)] \times S(t_{k+l-s}).$$

4. Вычисляем прогнозное время проведения следующего ТО для каждого элемента:

$$\tilde{T}_i^{TO}(t_{n+1}) = \frac{u_i^{TO}}{\tilde{a}_i(t_{k+1})}, \quad (7)$$

где  $u_i^{TO}$  – нормированное значение определяющего параметра  $i$ -го элемента, при

достижении которого необходимо проведение его ТО или замена (значение задано производителем).

Если принять  $u_i^{TO}(t) = u_i^{don}(t) = 1$  и подставить в (7), получим среднюю наработку до отказа  $i$ -го элемента:

$$\tilde{T}_{cpi} = \frac{1}{\tilde{a}_i(t_{k+1})}. \quad (8)$$

Выражение (8) соответствует утверждению, что в качестве математической модели (ММ) безотказности элементов можно использовать  $DN$ -распределение, если при расчете показателей безотказности используется структурная схема надежности, элементы которой соединены последовательно.

5. Определяем относительное прогнозное время проведения следующего ТО объекта:

$$\tilde{T}^{TO}(t_{n+1}) = \min_i \tilde{T}_i^{TO}(t_{k+1}),$$

где  $n$  – количество проведенных ТО на объекте,  $n = 1, 2, \dots$ , в отличие от  $k$  – количество проведенных КТС на объекте, время начала проведения КТС и ТО могут совпадать.

6. Определяем календарное время проведения следующего ТО объекта:

$$\tilde{t}_{n+1}^{TO} = t_n^{TO} + \tilde{T}^{TO}(t_{n+1}),$$

где  $t_n^{TO}$  – календарное время проведения предыдущего ТО.

Рассмотренная методика легла в основу при построении формализованной модели проведения технического обслуживания сложного технического объекта по стратегии адаптивного ТО по состоянию. Параметрами формализованной модели являются параметры технического обслуживания.

Таким образом, формализованная ММ процесса адаптивного ТО по состоянию при использовании двухпараметрического экспоненциального сглаживания имеет такой:

$$P_{Adapt\ TOC}^2 = \{\tau_{TOa}; E^{TO}; U^{TO}; T_k; \alpha; \beta\},$$

а формализованная ММ процесса адаптивного ТО по состоянию при использовании трехпараметрического экспоненциального сглаживания:

$$P_{Adapt\ TOC}^3 = \{\tau_{TOa}; E^{TO}; U^{TO}; T_k; \alpha; \beta; \gamma\},$$

где  $\tau_{TOa}$  – административное время, т.е. время перевода объекта из состояния «функционирование по назначению» в состояние «проведение ТО»;

$E^{TO}$  – множество обслуживаемых элементов объекта (при ТО не все элементы подвергаются обслуживанию или замене)  $E^{TO} \subset E_0$ ;  $U^{TO}$  – вектор уровней нормированных значений определяющих параметров,

$$U^{TO} = \{u_i^{TO}, i = \overline{1, E^{TO}}\};$$

$T_k$  – вектор времени проведения КТС.

## Выводы

В статье представлена методика прогнозирования времени проведения адаптивного ТО по состоянию, которая учитывает тренд и сезонность изменения определяющего параметра.

Построена математическая модель процесса ТО сложного технического объекта, которая может быть взята за основу для построения имитационной модели процесса технического обслуживания и ремонта. Предложенная модель отличается от существующих использованием дополнительных параметров процесса технического обслуживания и позволяет прогнозировать время проведения очередного ТО с учетом сезонных погодных условий. Имитационная модель позволит прогнозировать показатели надежности и стоимости эксплуатации объекта.

## 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. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун, В.А. Осыпа, С.А. Пашков, 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. Барзилович, Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. / Е.Ю. Барзилович. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
4. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Т.8. Эксплуатация и ремонт. М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
5. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов / А.К. Быкадоров и др. – М.: Высш. школа, 1978. – 320 с.
6. Ленков, С.В. Определение оптимальных параметров технического обслуживания по состоянию сложных объектов РЭТ / С.В. Ленков, А.В. Селюков, В.В. Зубарев, В.Н. Цыцарев // Информатика та математичні методи в моделюванні. – 2013. –Т.3., №3. – С. 215 – 224.
7. Стрельников, В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
8. Жердев, Н.К. Контроль устройств на интегральных схемах / Н.К. Жердев, Б.П. Креденцер, Р.Н. Белоконь. – К.:Техніка, 1986. – 160 с.

**ФОРМАЛІЗОВАНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АДАПТИВНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ СКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

Є.С. Ленков<sup>1</sup>, Г.Б. Жиров<sup>2</sup>, Т.В. Бондаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Військовий інститут телекомунікацій і інформатизації,  
вул. Московська, 45/1, 01011, м. Київ, Україна; e-mail: lenkov\_s@ukr.net

<sup>2</sup> Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка,  
вул. Ломоносова, 81, 03189, м. Київ, Україна

У статті запропонована математична модель процесу ТО складного технічного об'єкта. Параметрами моделі є параметри технічного обслуговування. Модель призначена для побудови імітаційної моделі процесу технічного обслуговування і ремонту з метою прогнозування показників надійності і вартості експлуатації об'єкта з урахуванням проведення різних стратегій технічного обслуговування і планових ремонтів.

**Ключові слова:** технічне обслуговування, дифузні розподілу, імітаційна модель, стратегія адаптивного обслуговування за станом

**FORMAL MATHEMATICAL MODEL OF ADAPTIVE MAINTENANCE DIFFICULT RADIO ELECTRONIC TECHNIQUE**

E. Lenkov<sup>1</sup>, G. Zhyrov<sup>2</sup>, T. Bondarenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Military Institute of Telecommunications and Information Technologies,  
45/1 Moskowska str., 01011, Kyiv, Ukraine; e-mail: lenkov\_s@ukr.net

<sup>2</sup> Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kiev,  
81, Lomonosova str., 03189, Kyiv, Ukraine

The article suggests a mathematical model of the process is a complex technical object. The model parameters are the maintenance parameters. The model is designed to build a simulation model of the process of maintenance and repair in order to predict reliability and cost of the facility, taking into account the various maintenance strategies and planned repairs.

**Keywords:** maintenance, diffuse distribution, simulation model, an adaptive service strategy as