

¹Канд. техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник наукового центру Військового інституту телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна

АЛГОРИТМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ СКЛАДНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ОБ'ЄКТІВ

Актуальність. Розробка складних радіоелектронних об'єктів та проведення їх технічного обслуговування неможлива без розробки моделей та програмних засобів, які б дані процеси оптимізували. Для цього у роботі розроблені відповідні алгоритми, які є частиною програмних засобів, що є актуальною задачею.

Мета. Метою даної роботи є розробка підходів щодо підвищення показників надійності об'єкта та зменшення вартості його експлуатації на основі використання імітаційного статистичного моделювання.

Метод. Метод дослідження базується на ідеї, що технічний стан об'єкта визначається технічним станом його елементів, а для визначення технічного стану елемента використовується поняття визначального параметра. Значення параметра можна контролювати засобами діагностування. В якості моделей відмов елементів використовується DN -розподіл.

Результати. Розроблені алгоритми являють складову частину імітаційної статистичної моделі об'єкта. Проведення моделювання дозволяє визначити оптимальні конструктивні характеристики об'єкта та параметри проведення його технічного обслуговування, а критеріями виступають максимізація показників надійності та мінімізація вартості експлуатації об'єкта.

Висновки. Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні алгоритмів проведення технічного обслуговування за станом, які на відміну від існуючих використовують прогностичний параметр середньої швидкості деградації визначального параметра елемента на основі моделі трипараметричного експоненціального згладжування.

Практичне значення полягає у розробці алгоритмів, що покладені в основу програмного забезпечення, яке реалізує процес визначення показників надійності та вартості експлуатації об'єкта радіоелектронної техніки від конструктивного складу самого об'єкта та від параметрів проведення технічного обслуговування.

Ключові слова: технічне обслуговування за станом, адаптивне технічне обслуговування, визначальний параметр.

НОМЕНКЛАТУРА

BBD – двійкова схема рішень;
 FORM – метод першого порядку другого моменту;
 MEMS – метод моделювання структурної надійності;
 MMDD – багатостадійна багатозначна схема рішень;
 Modelir_ATO – процедура алгоритму моделювання адаптивного ТОС;
 Modelir_TOС – процедура алгоритму моделювання ТОС з постійною періодичністю контролю;
 РЕТ – радіоелектронна техніка;
 ТО – технічне обслуговування;
 ТОіР – технічне обслуговування та ремонт;
 ТОР – технічне обслуговування за ресурсом;
 ТОС – технічне обслуговування за станом;
 ТС – технічний стан;
 $a_i(t_k)$ – поточне значення середньої швидкості деградації i -го параметра;
 $\tilde{a}_i(t_k)$ – прогнозне значення швидкості деградації i -го параметра;
 $C_{\text{кТС}}$ – вартість операції контролю ТС;
 Count – найбільший індекс списку ListEo;
 сто – змінна, в якій накопичується значення вартості ТО;
 DN – дифузний немонотонний розподіл;
 E – показник на дані, що стосуються поточного елемента e_i ;

E_0 – попередньо визначена множина елементів, що відмовляють;
 e_i – i -й елемент об'єкта;

i – параметр циклу;
 $L(t_{k-1})$ – згладжена величина на час контролю t_{k-1} ;
 ListEo – список елементів множини E_0 ;
 n – кількість елементів, що обслуговуються;
 N_I – кількість реалізацій моделювання;
 $R_i(t)$ – величина залишкового ресурсу в момент часу t ;
 $\bar{R}_i(t)$ – величина середнього залишкового ресурсу в довільний момент часу t ;
 R_{0i} – випадкова реалізація повного ресурсу i -го елемента;
 $S(t_{k-1})$ – коефіцієнт сезонності на час контролю t_{k-1} ;
 $S(t_{k-1-s})$ – коефіцієнт сезонності за цей же період в попередньому сезоні;
 t – поточний час;
 t_i – запланований (модельний) час відмови i -го елемента;
 t_{0i} – час останнього оновлення i -го елемента;
 T_k – періодичність проведення контролю;
 t_k – час контролю;
 $T_{\text{то}_p}$ – змінна, в якій накопичується значення часу проведення наступного ТО;
 $t_{\text{то}}$ – змінна, в якій накопичується значення тривалості ТО;
 $T'_{\text{ср}}$ – найменше значення середнього наробітку до відмови;

$\tilde{T}_{cpi}(t)$ – уточнене значення середнього наробітку до відмови i -го елемента;
 T_{cpi} – середній наробіток до відмови i -го елемента;
 $\tilde{T}_{to}(t)$ – уточнене значення до проведення наступного ТО;
 t_{to} – запланований час наступного ТО;
 T_e – час експлуатації об'єкта;
 \tilde{T}_0 – модельоване значення середнього наробітку на відмову;
 $u_i(t)$ – нормоване значення визначального параметра i -го елемента;
 u_{TOi} – нормоване граничне значення визначального параметра i -го елемента;
 α – коефіцієнт згладжування ряду;
 β – коефіцієнт згладжування тренда;
 γ – коефіцієнт упередження;
 Δt – інтервали дискретності накопичення статистики;
 λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента;
 τ_{toa} – адміністративний час на проведення ТО;
 $\tau_{ктс}$ – середній час контролю ТС;
 χ – коефіцієнт згладжування сезонності.

ВСТУП

Експлуатація складних сучасних технічних об'єктів, таких як РЕТ, неможлива без якісно налагодженої системи ТОіР. Така система необхідна для забезпечення необхідного рівня надійності даних об'єктів. Необхідність проведення технічного обслуговування полягає у своєчасній заміні елементів, які знаходяться в перед відмовному стані, а ремонт проводиться з метою відновлення справного або працездатного стану об'єкта, а також відновлення ресурсу всього об'єкта або його частини [1, 2].

Показники надійності та вартості експлуатації об'єктів РЕТ залежать, як від властивостей безвідмовності та ремонтпридатності самих об'єктів, так і від параметрів процесу проведення ТОіР. Для того, щоб мати можливість оптимізувати характеристики об'єкта (на етапі його розробки), а також параметри системи його ТОіР, необхідно попередньо побудувати моделі, які встановлюють зв'язок між параметрами об'єкта, системами та прогнозованими показниками надійності та вартості експлуатації об'єкта РЕТ.

На сьогоднішній день, залежно від критерію, який використовується при визначенні термінів проведення ТО, існують дві основні стратегії організації проведення ТО: ТО за ресурсом (ТОР) і ТО за станом (ТОС). При проведенні ТОР здійснюється контроль за поточним ресурсом об'єкта і в разі, якщо залишковий ресурс знижується до деякого заданого граничного значення, проводиться технічне обслуговування. При проведенні ТОС здійснюється контроль за поточним технічним станом об'єкта, а ТО проводиться у разі, якщо технічний стан об'єкта погіршується до деякого заданого неприпустимого рівня. У свою чергу, при проведенні ТОС можна виділити 2 стратегії: ТОС з постійною періодичністю контролю та ТОС зі змінною періодичністю контролю (адаптивне ТОС).

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На сьогоднішній час, існує загальна проблема оптимізації характеристик об'єкта та параметрів системи ТОіР з метою підвищення показників надійності об'єкта та зменшення вартості його експлуатації. Визначати показники надійності складних технічних об'єктів та їх взаємозв'язок з параметрами системи ТОіР на основі статистичних даних є складною задачею. Значно простіше та ефективніше, для встановлення зв'язків між даними параметрами і прогнозованими показниками надійності і вартості, проводити імітаційне статистичне моделювання. Для проведення моделювання необхідні: модель безвідмовності об'єкта та моделі (алгоритми) процесу проведення технічного обслуговування та ремонту.

Таким чином, у статті вирішується актуальна наукова задача щодо будови алгоритмів моделювання процесу проведення технічного обслуговування за станом для різних стратегій. Алгоритми являють собою складові частини загальної імітаційної статистичної моделі складного об'єкта РЕТ та параметрів системи ТОіР.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

При проектуванні складного технічного об'єкта важливо мати різноманітні інструменти (моделі, методики та алгоритми), а також програмне забезпечення для прогнозування показників надійності і вартості експлуатації в залежності від конструктивних особливостей самого об'єкта, а також від параметрів його експлуатації, параметрів технічного обслуговування і ремонту. Питаннями розрахунку і прогнозування надійності, а також створення моделей (в тому числі і імітаційних) займалася велика кількість відомих вчених в тому числі: Креденцер Б. П., Барзилович Є. Ю., Кокс Д., Сміт В., Каштанов В. О., Ушаков І. О., Барлоу Р., Прошан Ф. та ін.

В останні десятиліття, з метою поліпшення точності, були розроблені нові моделі і методи моделювання надійності складних технічних об'єктів і систем.

В [3] запропонований метод наслідування і оцінки надійності на основі динамічних байесовських мережах з використанням чисельного моделювання. Складні технічні об'єкти представляються типовими динамічними системами. При цьому, на думку авторів, даний метод долає обмеження аналітичного методу і методу багаторівневого синтезу та забезпечує ефективний засіб для оцінки надійності складних динамічних систем та об'єктів.

Недолік байесовських мереж полягає в тому, що вкрай складно отримати апостеріорний розподіл по усім можливим конфігураціям прихованих елементів мережі. Навчання мережі може бути простим, якщо б вдалося отримати достовірну вибірку по апостеріорному розподілу прихованих станів. Однак дана процедура є досить складною, в тому числі і в сенсі «ефекту пояснення», який полягає в тому, що дві причини, які є незалежними, можуть бути залежними для того, хто спостерігає певний ефект, який залежить від обох цих причин. Таким чином, щоб отримати апостеріорний розподіл, навіть у першому прихованому шарі мережі, потрібно інтегрувати по усім можливим конфігураціям прихованих змінних. А така процедура для складних мереж стає практично неможливою.

В [4] розроблено алгоритми для оцінки надійності систем з використанням байєсовських мереж при експоненціальному збільшенні кількості інформації, яку необхідно зберегти по мірі збільшення кількості компонентів у системі. Недоліки, які притаманні методам, що описані у [3], так само притаманні і алгоритмам на основі байєсовських мереж.

В [5] вивчалися фактори та методи розрахунку надійності складних систем з використанням методу динамічного моделювання. Завдяки симуляції роботи об'єкта та подальшого аналізу можуть бути отримані основні коефіцієнти надійності, однак даний підхід проблематично застосовувати до складних технічних систем і об'єктів.

В [6, 7] зроблений висновок, що традиційний аналіз дерева відмов не завжди достатній при аналізі складних систем. Для подолання даних обмежень пропонується застосовувати динамічні дерева відмов (DFT), а також різні методи до їх аналізу, у тому числі із застосуванням марківського підходу та моделювання за методом Монте-Карло. Перевагою даних методів є достатньо простий процес моделювання та низька обчислювальна складність, однак точність визначення показників надійності може бути недостатньо для вирішення практичних задач.

В [8] запропоновано методологію визначення оптимальних параметрів надійності (швидкості відмов та відновлень) компонентів для системи теплопостачання, які забезпечують необхідний рівень надійності мережі. Методологія вирішення зазначеної проблеми базується на методах теорії гідрравлічних схем, показників надійності вузла та моделях випадкових процесів Маркова.

Переваги запропонованої методології полягають у спільній оптимізації надійності компонентів джерел та схем мереж, інтеграції процедур зменшення частот відмов та поліпшення швидкості відновлення, відсутності необхідності проводити ітеративні розрахунки при використанні середніх параметрів надійності компонентів, враховуючи необхідні рівні показників надійності. Недоліком запропонованого підходу є зосередження на визначенні комплексних показників надійності.

Також, на сьогоднішній час, відсутній вітчизняний програмний комплекс по розрахунку показників надійності складних радіоелектронних об'єктів з урахуванням різних стратегій технічного обслуговування і ремонту. Математичною основою такого програмного комплексу повинна бути імітаційна статистична модель самого об'єкта та системи ТОiP, як єдиного цілого. Для вирішення наведеної загальної проблеми, необхідно вирішити задачу щодо будови алгоритмів моделювання процесу проведення технічного обслуговування для різних стратегій.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Принцип ТО за станом, реалізований в моделі на основі прийняття наступних припущень: для обслуговування елементів (E_0 – визначена множина елементів, що відмовляють), завжди існують визначальні параметри, які характеризують їх технічний стан; випадковий процес деградації визначальних параметрів, має постійну середню швидкість. Найбільш близько зазначеним припущенням відповідає модель DN -розподілу випадкового наросту до відмови.

Моделювання процесу ТОС з постійною періодичністю контролю. Сутність стратегії ТОС з постійною періодичністю контролю висвітлений у [1, 9]. Використання даної стратегії передбачає при технічному контролі проводити вимірювання визначальних параметрів усіх елементів, що потенційно підлягають обслуговуванню (E_0). Якщо виміряне значення визначального параметра i -го елемента $u_i(t)$ перевищує заздалегідь задане значення (значення рівня проведення ТО u_{TOi}), проводиться оновлення (заміна) i -го елемента. Кожну відмову елемента можна інтерпретувати як подію, що полягає у перевищенні поточного нормованого значення визначального параметра елемента $u_i(t)$, граничної межі. Якщо припустити, що середній ресурс елемента убуває в часі по лінійному закону, то величина середнього залишкового ресурсу в довільний момент часу t дорівнює $\bar{R}_i(t) = T_{срi} - t$, де $T_{срi}$ – середній наробіток до відмови i -го елемента.

При моделюванні заздалегідь відомі заплановані випадкові моменти часу відмов елементів та періодичність проведення контролю – T_k . Якщо відмова i -го елемента запланована на момент часу t_i , ($t_i > t$), то його залишковий ресурс в момент часу t дорівнює:

$$R_i(t) = t_i - t, \quad (1)$$

де t_i – запланований (модельний) час відмови i -го елемента, t – поточний час.

Залишковому ресурсу $R_i(t)$ можна поставити у відповідність випадкове значення нормованого визначального параметра $u_i(t)$, величина якого визначається:

$$u_i(t) = 1 - \frac{R_i(t)}{R_{0i}}, \quad (2)$$

де R_{0i} – випадкова реалізація повного ресурсу i -го елемента. Значення величини R_{0i} визначається виразом:

$$R_{0i} = t_i - t_{0i}, \quad (3)$$

де t_{0i} – час останнього оновлення i -го елемента; t_i – запланований час відмови i -го елемента.

Після підстановки у вираз (2) формул по визначенню залишкового ресурсу i -го елемента $R_i(t)$ (формула 1) та повного ресурсу i -го елемента R_{0i} (формула 3), нормоване значення визначального параметра i -го елемента $u_i(t)$ можна отримати за виразом (4):

$$u_i(t) = \frac{t - t_{0i}}{t_i - t_{0i}}. \quad (4)$$

Рішення про необхідність проведення ТО i -го елемента приймається за критерієм – $u_i(t) \geq u_{TOi}$. З урахуванням (4) даний критерій представляється нерівністю:

$$t \geq t_{0i} + u_{TOi}(t_i - t_{0i}). \quad (5)$$

Таким чином, в процесі моделювання в момент часу t проведення контролю, необхідно для кожного i -го елемента, що обслуговується, перевірити виконання умови (5), якщо ця умова виконується, імітувати проведення ТО. Імітація ТО повинна включати: генерування нового випадкового значення часу відмови елемента t_i , а час останнього оновлення i -го елемента t_{0i} встановити рівним поточному часу t .

Алгоритм процесу моделювання технічного обслуговування за станом з постійною періодичністю контролю (процедура Modelir_TOC).

Структурна схема алгоритму моделювання процесу ТОС з постійною періодичністю контролю (процедура Modelir_TOC) зображена на рис. 1. Алгоритм виконується в поточний момент модельного часу t , що є часом контролю ТС об'єкта.

Оператор 1 виконує підготовчі операції, встановлює початкові значення змінних: i – параметр циклу, в якому буде здійснюватися перебір всіх елементів $e_i \in E_0$ (елементів списку ListEo); E_0 – попередньо визначена множина елементів, що відмовляють; t_{to} і t_{cto} – змінні, в яких накопичуються значення тривалості та вартості ТО (результуюча інформація процедури). Оператор 2 формує покажчик E на дані, що відносяться до поточного елемента e_i . Оператор 3 перевіряє, чи є елемент e_i таким, що обслуговується при проведенні ТО. Якщо елемент обслуговується, то виконуються оператори 4–7. Оператор 4 імітує вимір визначального параметра $u_i(t)$ відповідно до виразів (1–4). Оператор 5 перевіряє виконання критерію $u_i(t) \geq u_{TOi}$. Оператор 6 імітує виконання ТО

(оновлення елемента e_i) та генерує наступний випадковий час до відмови елемента e_i .

Оператор 7 здійснює накопичення даних у змінних t_{to} і t_{cto} . Оператори 8 і 9 забезпечують циклічне виконання операторів 4–7 для всіх обслуговуваних елементів зі списку ListEo. Як тільки параметр циклу i вийде за межі діапазону індексів елементів списку ListEo ($i > \text{ListEo.Count} - 1$), оператор 9 завершує виконання циклу. У змінних t_{to} і t_{cto} , які є параметрами процедури, формуються значення тривалості та вартості виконаного технічного обслуговування.

Моделювання процесу ТОС з адаптивною періодичністю контролю. Формалізований опис процесу, що моделюється. Сутність стратегії ТОС з адаптивною періодичністю контролю висвітлений у [1, 10, 11]. У поточний момент часу t визначається (вимірюється) середня швидкість деградації визначальних параметрів елементів за виразом:

$$a_i(t) = u_i(t)/(t - t_{0i}). \quad (6)$$

За «виміряним» значенням $a_i(t)$ розраховуються прогностні значення швидкості деградації $\tilde{a}_i(t)$, які після кожного вимірювання уточнюються за формулою дво-параметричного експоненціального згладжування:

$$\tilde{a}_i(t_k) = \beta \tilde{a}_i(t_{k-1}) + (1 - \beta) a_i(t_k), \quad (7)$$

де $\tilde{a}_i(t_{k-1})$ – попереднє (отримане в момент часу t_{k-1}) значення прогностної швидкості $\tilde{a}_i(t)$; $a_i(t_k)$ – поточне значення середньої швидкості деградації i -го параметра, виміряне в момент часу t_k ; β – коефіцієнт згладжування тренда.

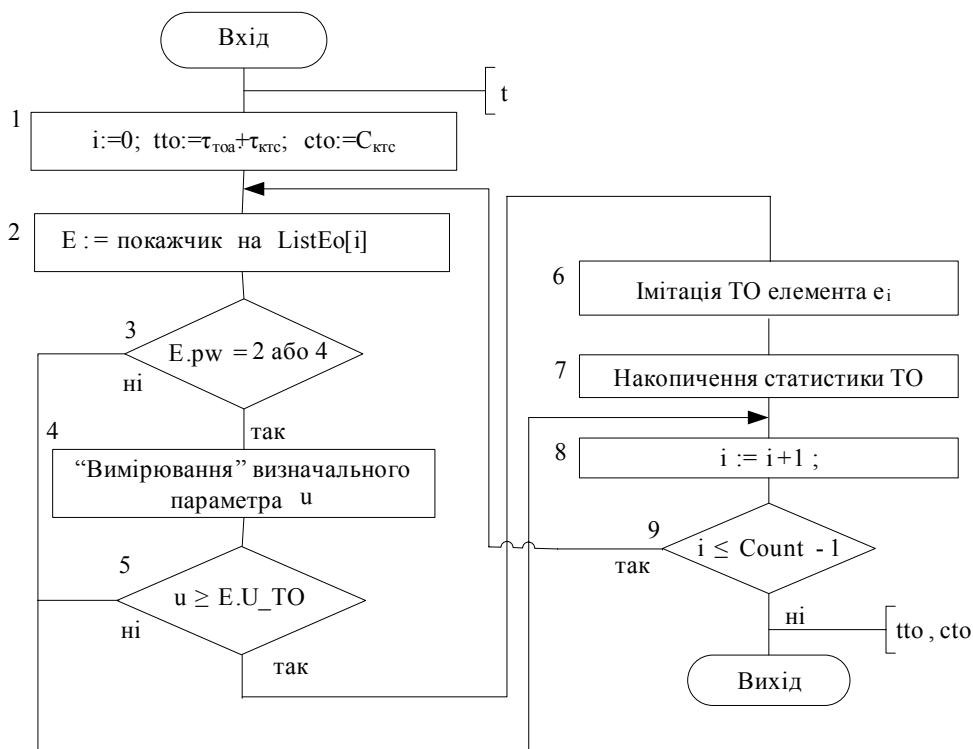


Рисунок 1 – Алгоритм процедури Modelir_TOC

В свою чергу, оцінку середньої швидкості деградації, при виборі моделі трипараметричного експоненціального згладжування, визначається за виразом:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_i(t_k) &= [L(t_{k-1}) + T(t_{k-1})] \times S(t_{k-s}); \\ L(t_{k-1}) &= \alpha \cdot \frac{a_i(t_{k-1})}{S(t_{k-1-s})} + (1-\alpha)[S(t_{k-2-s}) - T(t_{k-2})]; \\ T(t_{k-1}) &= \beta \cdot (S(t_{k-1}) - S(t_{k-2})) + (1-\beta) \cdot T(t_{k-2}); \\ S(t_{k-1}) &= \chi \cdot \frac{a_i(t_{k-1})}{L(t_{k-1})} + (1-\chi) \cdot S(t_{k-1-s}), \end{aligned}$$

де α – коефіцієнт згладжування ряду; β – коефіцієнт згладжування тренда; χ – коефіцієнт згладжування сезонності; $L(t_{k-1})$ – згладжена величина на час контролю t_{k-1} ; $T(t_{k-1})$ – значення тренду на час контролю t_{k-1} ; $S(t_{k-1})$ – коефіцієнт сезонності на час контролю t_{k-1} ; $S(t_{k-1-s})$ – коефіцієнт сезонності за цей же період в попередньому сезоні. За уточненими значеннями швидкості $\tilde{a}_i(t)$ визначаються уточнені оцінки середнього наробітку до відмови елементів:

$$\tilde{T}_{cpi}(t) = 1 / \tilde{a}_i(t). \tag{8}$$

Нове значення часу до наступного ТО \tilde{T}_{TO} визначається за евристичною формулою:

$$\tilde{T}_{TO}(t) = \gamma T'_{cp}, \tag{9}$$

де T'_{cp} – найменше значення середнього наробітку до відмови, з отриманих за формулою (8); γ – коефіцієнт упередження, оптимальна величина якого визначається експериментально (за результатами моделювання). Після цього визначається запланований час наступного ТО $t_{TO} = t + \tilde{T}_{TO}(t)$.

Алгоритм процесу моделювання адаптивного ТОС. Структурна схема алгоритму моделювання адаптивного ТОС (процедура Modelir_ATO), зображена на рис. 2.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Специфіка сучасних складних радіоелектронних об'єктів полягає у наявності в їх складі великої кількості різнотипних вузлів, блоків та інших комплектуючих елементів, які зазвичай мають різний рівень надійності, а також різні закони процесів зносу та старіння. Перевірити виграш у показниках надійності та вартості експлуатації для різних стратегій технічного обслуговування, при проведенні натурних експериментів, дуже складно, в першу чергу, через великий час проведення експериментів та відсутності точних теоретичних моделей кожного об'єкта. Між тим авторами були проведені експерименти над складною спеціальною радіоелектронною техні-

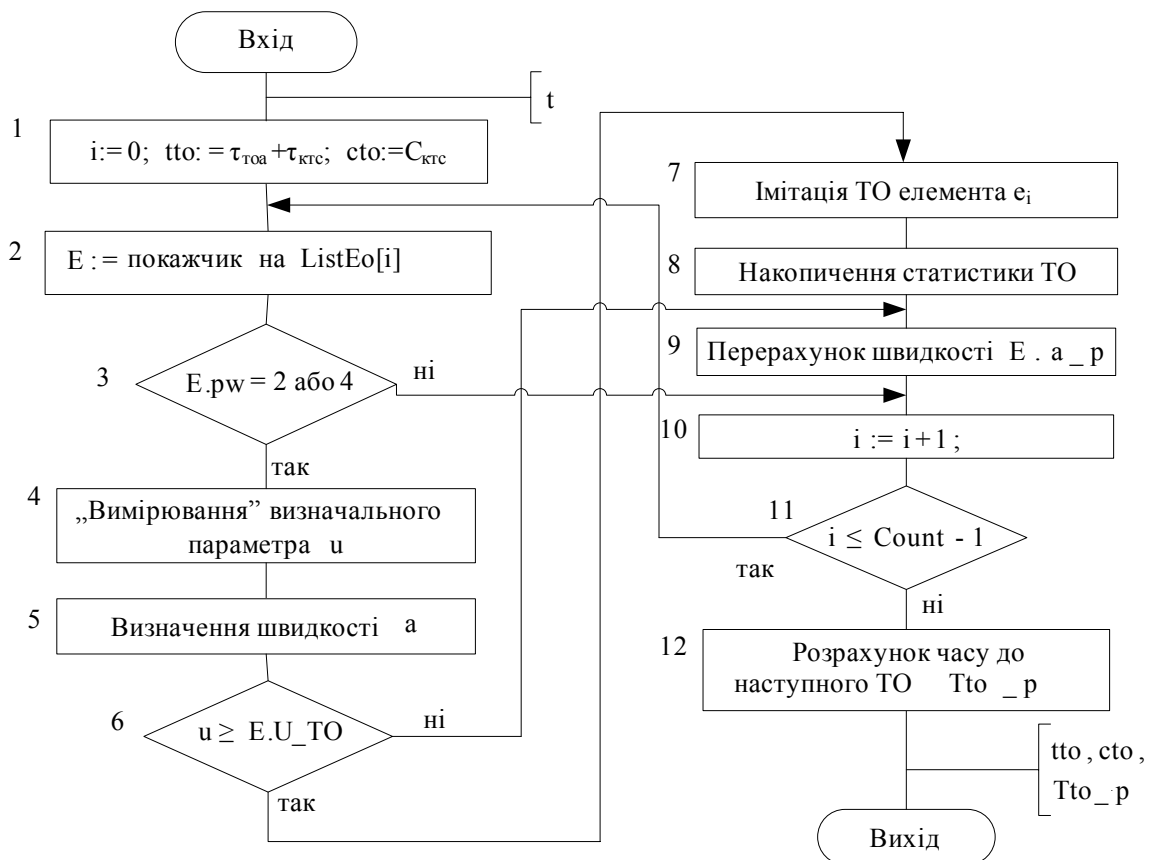


Рисунок 2 – Алгоритм процедури Modelir_ATO

кою. Навіть короткий опис умов проведення експерименту та аналізу результатів, займає значний обсяг інформації (декілька десятків сторінок). Між тим розрахунки підтвердили зазначений вище вигреш, при використанні імітаційного статистичного моделювання. Сутність такої перевірки полягає у аналізі поведінки показників надійності при направленому варіюванні основними параметрами технічного обслуговування.

Для наочності та розуміння сутності впливів параметрів процесу ТО на показники надійності та вартості експлуатації радіоелектронного об'єкта у статті показано моделювання таких процесів на простому об'єкті – тестовому об'єкті Test-1.

Конструктивна структура даного об'єкта наведена на рис. 3. Об'єкт Test-1 представляється послідовною структурною схемою надійності та має 6 рівнів вкладеності. Окремі елементи на рисунку позначені окремими колами. Елементи, що включені до множини відновлювальних елементів (E_O), відмічені штриховкою.

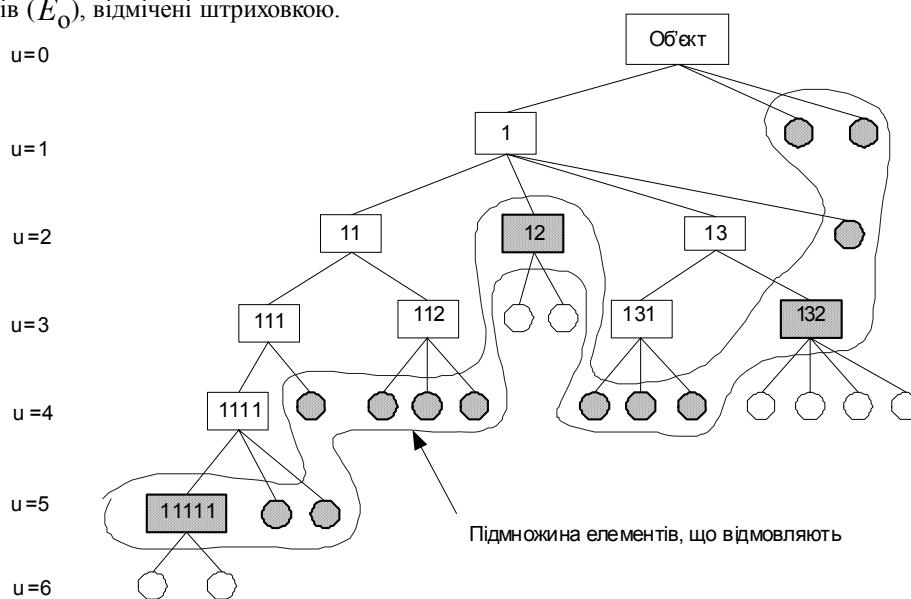


Рисунок 3 – Конструктивна структура тестового об'єкта Test-1

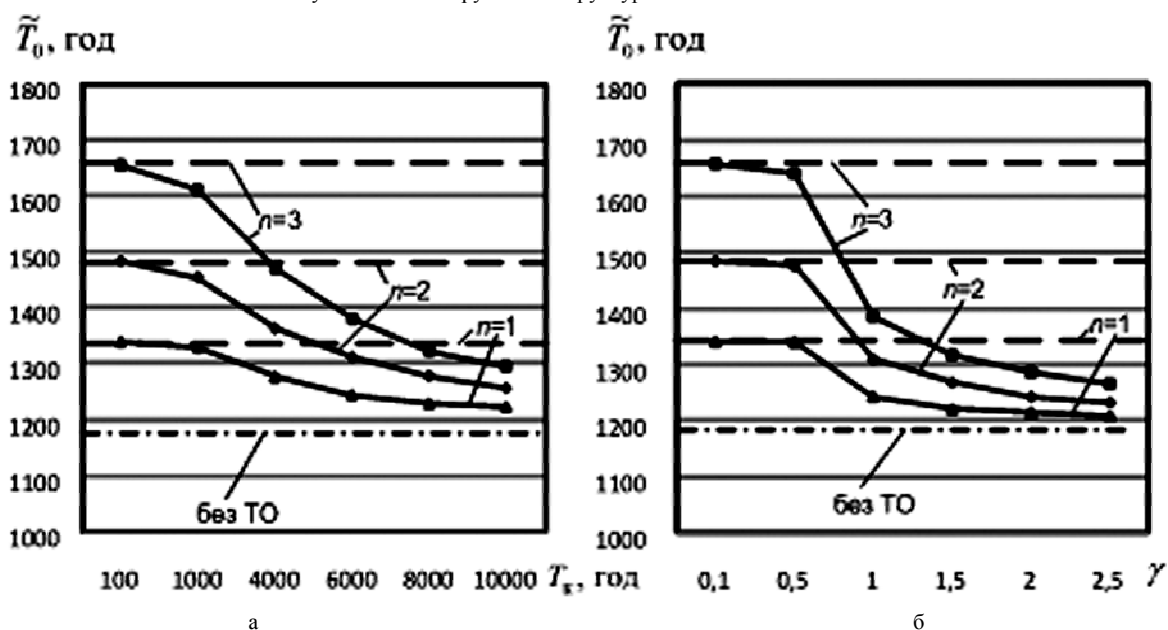


Рисунок 4 – Залежності середнього наробітку на відмову \tilde{T}_0 від параметрів ТО:
 а – стратегія ТОС з постійною періодичністю контролю; б – стратегія адаптивне ТОС

При проведенні моделювання кількість елементів, що обслуговуються, змінювалась від 1 до 3. Для цього було обрано найменш надійні елементи (12, 132 та 11111). Одночасно змінювались параметри ТО: періодичність контролю T_k – для стратегії ТОС; коефіцієнт упередження γ – для стратегії адаптивного ТОС. Параметри моделювання однакові для різних стратегій: $T_e = 20$ років, $\Delta t = 3$ міс. і $N_I = 300$, де T_e – час експлуатації об'єкта; Δt – інтервали дискретності накопичення статистики; N_I – кількість реалізацій моделювання.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

За результатами моделювання були побудовані залежності показника безвідмовності об'єкта \tilde{T}_0 від параметрів технічного обслуговування рис. 4.

Для стратегії ТОС з постійною періодичністю контролю, T_k змінювалась в діапазоні від 100 до 10000 год, для стратегії адаптивного ТОС, коефіцієнт упередження γ змінювався в межах від 0,1 до 2,5, а коефіцієнт згладжування тренда β , дорівнював $-0,5$. Для всіх стратегій, рівні u_{TOi} була задані однаковими і складала: $u_{TOi} = 0,5$.

Пунктирними лініями на графіках показані рівні безвідмовності (середній наробіток на відмову \tilde{T}_0), що відповідають ідеальному технічному обслуговуванню. Під ідеальним ТО розуміється таке ТО, при якому елементи, що обслуговуються, ніколи не відмовляють. Штрих-пунктирною лінією показаний рівень безвідмовності об'єкта ($\tilde{T}_0 = 1187$ год.), у якого ТО не проводиться.

6 ОБГОВОРЕННЯ

З аналізу графіків, рис. 4 видно, як зростає рівень безвідмовності об'єкта при збільшенні обсягу ТО (n – кількість елементів, що обслуговуються), а також при зменшенні періодичності технічного обслуговування. Періодичність ТО при стратегіях ТО за станом є випадковою, оскільки обслуговування елементів проводяться тільки у тих випадках, якщо їх ТС погіршився до заданого граничного рівня ТО. Для даних стратегій, середня періодичність ТО зменшується, якщо зменшується періодичність контролю T_k (коефіцієнт упередження γ). При невеликій періодичності ТО (при $T_k = 100$ год і при $\gamma = 0,1$) рівень безвідмовності об'єкта \tilde{T}_0 наближається до рівня, що відповідає ідеальному технічному обслуговуванню.

Статистична помилка (95% довірчий інтервал) оцінок \tilde{T}_0 у всіх розрахунках в розглянутих прикладах моделювання ТО для об'єкта Test-1 дорівнює $\varepsilon = 15 \div 16\%$.

За отриманими результатами розрахунків, з урахуванням ТО, видно, що поведінка показника безвідмовності \tilde{T}_0 , при варіюванні параметрами ТО, цілком відповідає фізичному змісту модельованого процесу, що дозволяє зробити якісний висновок про адекватність розроблених алгоритмів процесу проведення ТО.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну наукову задачу щодо розробки алгоритмів моделювання процесів проведення технічного обслуговування за станом складних об'єктів РЕТ для різних стратегій ТО.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні алгоритмів проведення технічного обслуговування за станом складних об'єктів РЕТ, які на відміну від існуючих використовують прогностичний параметр середньої швидкості деградації визначального параметра елемента на основі моделі трипараметричного експоненціального згладжування, що дозволить підвищити точність визначення часу контролю технічного стану з урахуванням сезонності.

Практичне значення полягає у розробці програмного забезпечення, яке реалізує процес визначення показників надійності та вартості експлуатації об'єкта РЕТ від конструктивного складу самого об'єкта та від параметрів проведення технічного обслуговування. Отримані результати необхідні при проектуванні (модернізації) об'єкта та визначенні оптимальних, для нього, параметрів проведення ТОiP.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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 и др.]. – 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 и др.]. – К. : КВИРТУ ПВО, 1982. – 226 с.
3. Xiao Feng Liang Warship reliability evaluation based on dynamic bayesian networks and numerical simulation / Xiao Feng Liang, Hong Dong Wang, Hong Yi, Dan Li // Ocean Engineering. – 2017. – No. 136. – P. 129–140.
4. Iris Tien Algorithms for Bayesian network modeling and reliability assessment of infrastructure systems / Iris Tien, Armen Der Kiureghian // Reliability Engineering & System Safety. – 2016. – No. 156. – P. 134–147.
5. Zhang Hui Reliability Factors Analysis of MEMS Safety and Arming System / Zhang Hui, Wang Ying, Lou Wenzhong, Liu Fangyi, Wang Fufu // Engineering Materials. – 2014. – Vol. 609–610. – P. 1494–1497. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.609-610.1494.
6. Hao J. Reliability analysis based on improved dynamic fault tree / J. Hao, L. Zhang, L. Wei // Engineering asset management. – London : Springer, 2011. – P. 283–299. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4993-4_26.
7. Lindhe A. Approximate dynamic fault tree calculations for modelling water supply risks / A. Lindhe, T. Norberg, L. Rosén // Reliability Engineering & System Safety. – 2012. – Volume 106, October 2012. – P. 61–71. DOI: 10.1016/j.res.2012.05.003
8. Postnikova Ivan V. A Methodology for Optimization of Component Reliability of Heat Supply Systems / [Ivan V. Postnikova, Valery A. Stennikova, Ekaterina E. Mednikovaa, Andrey V. Penkovskiiia] // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 105. – P. 3083–3088. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.643
9. Жиров Г.Б. Алгоритмічна модель процесу технічного обслуговування за станом з постійною періодичністю контролю / Г. Б. Жиров, Е. С. Ленков // Сучасна спеціальна техніка: наук-пр. журн. – 2017.– №1(48). – С. 26–29.
10. Жиров Г. Б. Алгоритмічна модель адаптивного технічного обслуговування за станом озброєння і військової техніки / Г. Б. Жиров, Е. С. Ленков / Збірник праць Національної академії Державної прикордонної служби України імені Б. Хмельницького. Серія : військові та технічні науки. –2017. – Вип. 1 (71). – С.368–378.
11. Жиров Г. Б. Усовершенствованная имитационная модель процесса технического обслуживания и ремонта сложного технического объекта / Г. Б. Жиров, Е. С. Ленков // Журнал Харківського національного університету Повітряних Сил імені І. Кожедуба «Системи обробки інформації». – 2017. – Вип. № 3 (149). – С. 14–18.

Стаття надійшла до редакції 05.12.2017.

Після доробки 12.02.2018.

Жиров Г. Б.¹, Ленков Е. С.²

¹Канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра Военного института Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

²Канд. техн. наук, старший научный сотрудник научного центра Военного института телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Актуальность. Разработка сложных радиоэлектронных объектов и проведение технического обслуживания невозможна без разработки моделей и программных средств для оптимизации данных процессов. Для этого в работе разработаны соответствующие алгоритмы, которые являются частью программных средств, что является актуальной задачей.

Цель. Целью данной работы является разработка подходов по повышению показателей надежности объекта и уменьшения стоимости его эксплуатации на основе использования имитационного статистического моделирования.

Метод. Метод исследования базируется на идее, что техническое состояние объекта определяется техническим состоянием его элементов, а для определения технического состояния элемента используется понятие определяющего параметра. Значение параметра можно контролировать средствами диагностирования. В качестве моделей отказов элементов используется *DN*-распределение.

Результаты. Разработанные алгоритмы являются составной частью имитационной статистической модели объекта. Проведение моделирования позволяет определить оптимальные конструктивные характеристики объекта и параметры проведения его технического обслуживания, а критерием выступают максимизация показателей надежности и минимизация стоимости эксплуатации объекта.

Выводы. Научная новизна работы заключается в усовершенствовании алгоритмов технического обслуживания по состоянию, которые в отличие от существующих используют прогнозный параметр средней скорости деградации определяющего параметра элемента на основе модели трехпараметрического экспоненциального сглаживания.

Практическое значение состоит в разработке алгоритмов, которые положены в основу программного обеспечения, которое реализует процесс определения показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта радиоэлектронной техники от конструктивного состава самого объекта и от параметров проведения технического обслуживания.

Ключевые слова: техническое обслуживание по состоянию, адаптивное техническое обслуживание, определяющий параметр.

Zhyrov G. B.¹, Lenkov E. S.²

¹PhD, Senior Research Fellow, Leading Researcher at the Research Center of Military Institute of Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

²PhD, Senior Researcher at the Scientific Center of Military Institute of Telecommunications and Informatization, Kyiv, Ukraine

ALGORITHMS OF SIMULATION OF TECHNICAL SERVICE PROCESSES AS COMPLEX RADIOELECTRONIC OBJECTS

Context. Development of complex radioelectronic facilities and maintenance is impossible without the development of models and software, to optimize these processes. For this, the corresponding algorithms have been developed in the work, which are part of the software, which is an urgent task.

Objective. The purpose of this work is to develop approaches to improve the reliability of the object and reduce the cost of its operation based on the use of simulation statistical modeling.

Method. The method of investigation is based on the idea that the technical state of an object is determined by the technical state of its elements, and the concept of a determining parameter is used to determine the technical state of an element. The value of the parameter can be controlled by means of diagnostics. As the models of element failures, a *DN*-distribution is used.

Results. The developed algorithms are an integral part of the simulation statistical model of the object. The simulation allows to determine the optimal design characteristics of the object and the parameters of its maintenance, and the criterion is to maximize reliability indicators and minimize the cost of operating the facility.

Conclusions. The scientific novelty of the work is to improve the state maintenance algorithms, which, unlike the existing ones, use the predictive parameter of the average degradation rate of the element's determining parameter based on the three-parameter exponential smoothing model.

Practical value consists in the development of algorithms that form the basis of software that implements the process of determining reliability indicators and the cost of operating an object of radioelectronic equipment from the structural composition of the facility itself and the parameters of maintenance.

Keywords: maintenance according to condition, adaptive maintenance, defining parameter.

REFERENCES

1. Lenkov S. V., Boriak K. F., Banzak G. V., Braun V. O., Osypa V. A., Pashkov S. A., Tsytarev V. N., Berezovskaia Iu. V. Prognozirovanie nadezhnosti slozhnyh obektov radiojelektronnoj tehniky i optimizacija parametrov ih tehnichej jekspluatacii s ispolzovaniem imitacionnyh statisticheskikh modelej. Odessa, VMV, 2014 256 p.
2. Butochnov A. N., Kredencer B. P., Tocenko V. G., Cycarev V. N. i dr. *Osnovy nadezhnosti i tehnichego obespechenie radiojelektronnyh sredstv RTV PVO*. Kyiv, KKVIRTU PVO, 1982, 226 p.
3. Xiao Feng Liang, Hong Dong Wang, Hong Yi, Dan Li. (). Warship reliability evaluation based on dynamic bayesian networks and numerical simulation, *Ocean Engineering*, 2017, No. 136, pp. 129–140.
4. Iris Tien, Armen Der Kiureghian Algorithms for Bayesian network modeling and reliability assessment of infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, Vol. 156, pp. 134–147.
5. Zhang Hui, Wang Ying, Lou Wenzhong, Liu Fangyi, Wang Fufu. Reliability Factors Analysis of MEMS Safety and Arming System. *Engineering Materials*, 2014, Vol. 609–610, pp. 1494–1497. ISSN: 1662-9795. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.609-610.1494.
6. Hao J, Zhang L, Wei L. Reliability analysis based on improved dynamic fault tree. *Engineering asset management*. London: Springer, 2011, pp. 283–299. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4993-4_26.
7. Lindhe A, Norberg T, Rosén L. Approximate dynamic fault tree calculations for modelling water supply risks. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, Volume 106, October, pp. 61–71 <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.05.003>
8. Ivan V. Postnikova, Valery A. Stennikova, Ekaterina E. Mednikovaa, Andrey V. Penkovskiiia A Methodology for Optimization of Component Reliability of Heat Supply Systems *Energy Procedia*, 2017, Volume 105, pp. 3083–3088. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.643>
9. Zhiron G. B., Lenkov E. S. Algoritmichna model procesu tehnichego obslugovuvannja za stanom z postijnoju periodichnistju kontrolju. *Suchasna specialna tehnika*, 2017, No. 1(48), pp. 26–29.
10. Zhiron G. B., Lenkov E. S. Algoritmichna model adaptivnogo tehnichego obslugovuvannja za stanom ozbroennja i vijskovoï tehniki. *Zbirnik prac Nacionalnoï akademii Derzhavnoï prikordonnoï sluzhbi Ukraini imeni B. Hmelnickogo. Serija: vijskovi ta tehniczni nauki*. 2017, No. 1(71), pp. 368–378.
11. Zhiron G. B., Lenkov E. S. Uovershenstvovannja imitacionnaja model processa tehnichego obsluzhivannja i remonta slozhnogo tehnichego obekta, *Sistemi obrobki informacii*, 2017, No. 3 (149), pp. 14–18.