

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ З ФІКСОВАНОЮ ТА АДАПТОВАНОЮ ПЕРІОДИЧНІСТЮ КОНТРОЛЮ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОЗБРОЄННЯ

У статті представлена імітаційно-статистична модель, яка призначена для прогнозування показників надійності і вартості експлуатації складного технічного об'єкта озброєння, що залежать від параметрів обраної стратегії. В ІСМ реалізовані алгоритми імітації процесів ТО для двох варіантів стратегій: з постійною періодичністю контролю та з адаптивною періодичністю контролю. Режим моделювання регламентованого ТО введений з метою забезпечення повноти аналізу можливих стратегій ТО проектного об'єкта і прогнозування можливого виграшу в надійності і вартості експлуатації об'єкта за рахунок застосування наведених стратегій.

Методична точність моделі визначається наступними факторами: вихідної надійністю об'єкта; кількістю реалізацій (тривалістю) моделювання; заданою тривалістю експлуатації об'єкта.

Ключові слова: моделювання, технічне обслуговування, складні технічні засоби озброєння.

Вступ та постановка задачі. Складні технічні об'єкти озброєння відносяться до класу відновлюваних об'єктів тривалого багаторазового застосування. Вони, як правило, є дорогими і вимагають значних витрат на їх експлуатацію. Від рівня безвідмовності таких об'єктів залежить обороноздатність держави, економічна безпека та життя людей. Для забезпечення необхідного рівня безвідмовності в процесі їх експлуатації зазвичай проводиться технічне обслуговування (ТО).

Характерною особливістю складних технічних об'єктів є наявність в їх складі великої кількості різномісних комплектуючих елементів, які мають різний рівень надійності, різні закономірності процесів їх зносу, старіння та деградації. Ця особливість вимагає більш тонкого підходу до організації і планування ТО в процесі їх експлуатації.

Саме тому в даній статті поставлена задача моделювання процесів технічного обслуговування за станом з фіксованою та адаптованою періодичністю контролю складних засобів озброєння.

Модель з фіксованою періодичністю. Зміст ТО за станом (ТОС) з фіксованою періодичністю контролю полягає в тому, що проводиться вимірювання визначальних параметрів всіх елементів, які потенційно підлягають обслуговуванню. В разі, коли виміряне значення нормованого визначального параметра $u_i(t)$ перевищує задане значення рівня $u_{\text{то}i}$, проводиться відновлення (заміна) i -го елемента.

Для моделювання відмов ми використовуємо DN -розподілу, що по своїй суті є імовірнісною фізичною моделлю (ІФ) відмов [1,2]. Це означає, що кожна відмова інтерпретується як подія, що полягає у виході визначального параметра елемента за допустимі межі (значення нормованого визначального параметру $u_i(t)$ досягло значення 1). Якщо припустити, що середній ресурс елемента лінійно убиває у часі (таке припущення покладено в основу ВФ-моделі), то величина середнього залишкового ресурсу в довільний момент часу t дорівнює

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

де $T_{\text{ср}i}$ - середня наробіток до відмови i -го елемента.

Якщо в процесі моделювання нам відомо, що відмова i -го елемента відбувається в момент часу t_i (це запланований час відмов), то залишковий ресурс i -го елемента в момент часу t визначається виразом

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

Величина $R_i(t)$ в даному випадку є випадковою реалізацією залишкового ресурсу, який можна поставити у відповідність значенню нормованого визначального параметра, величину якого можна визначити наступним чином:

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

де R_{0i} - випадкова реалізація повного ресурсу i -го елемента, величина якого дорівнює

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

З урахуванням (2) і (4) замість (3) можна визначити:

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

де t – поточний час контролю;

t_{0i} - час останньої відмови i -го елемента;

t_i - запланований час відмови i -го елемента.

Умова досягнення визначальним параметром $u_i(t)$ заданого рівня $u_{\text{то}i}$ в такому випадку запишеться у вигляді наступного рівняння:

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

Якщо допустимий елемент є резервованою групою елементів, то ступінь близькості групи до стану відмови визначається виразом:

$$u_i(t) = \frac{n_{\text{pi}}(t)}{n_i}, \quad (7)$$

де n_i - кількість елементів в резервованій групі;

$n_{\text{pi}}(t)$ - кількість працездатних елементів в резервованій групі в момент часу t .

Структурна схема алгоритму моделювання ТО зображена на рис. 1, алгоритм виконується в поточний момент модельного часу t , є часом контролю з фіксованою періодичністю T_k .

Оператори 1, 7 та 8 утворюють цикл, в якому проводиться перебір номерів потенційно обслуговуваних елементів. В операторі 1 одночасно ініціалізуються змінні $\tau_{\text{то}}$ та $C_{\text{то}}$, в яких будуть формуватися значення тривалості і вартості.

Оператор 2 імітує вимірювання визначального параметра i -го елемента. Програмно виміряне значення параметра $u_i(t)$ визначається виразом (5) чи (7).

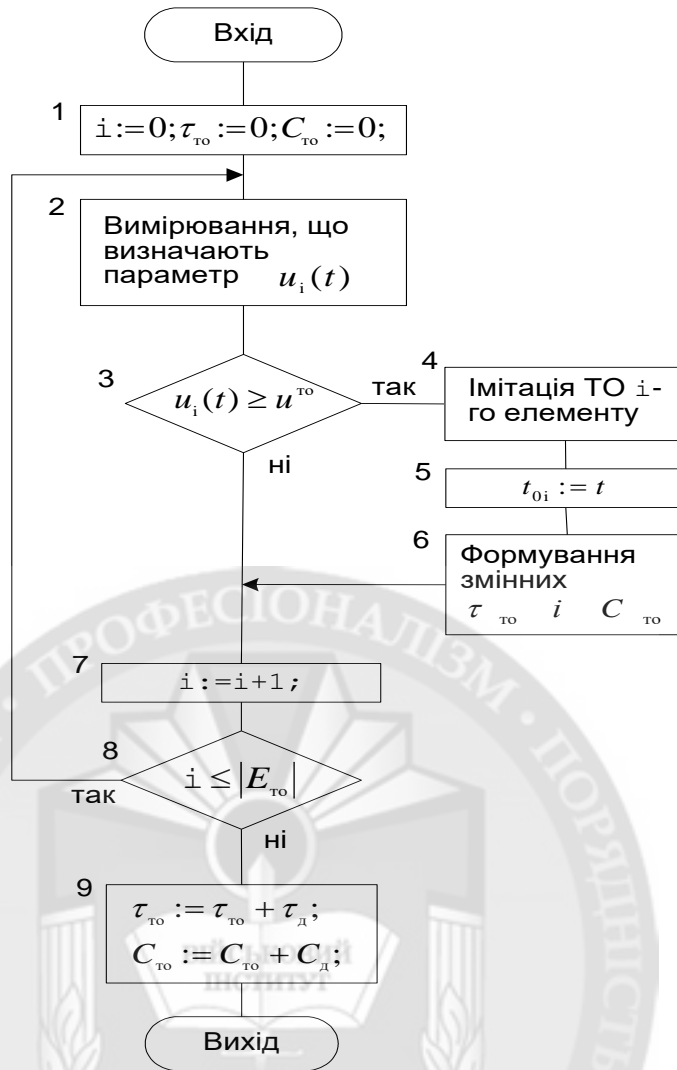


Рис. 1. Алгоритм моделювання ТОС з фіксованою періодичністю контролю

Оператор 3 перевіряє умову досягнення визначальним параметром $u_i(t)$ рівня ТО $u_{тоi}$ (перевіряється виконання нерівності $u_i(t) \geq u_{тоi}$). Якщо умова виконується, управління передається операторам 4-6. Оператор 4 імітує відновлення (заміну) i -го елемента.

Генерується нова величина випадкового напрацювання до відмови, визначається нове значення запланованого часу відмови i -го елемента і отримане значення t_i зберігається в календарі подій. Якщо елемент являє собою резервированну групу або послідовне з'єднання однотипних елементів, то оновлюється вся група.

Оператор 5 запам'ятовує час останнього відновлення i -го елемента t_{0i} .

Оператор 6 здійснює накопичення даних в змінних $\tau_{то}$ і $C_{то}$:

$$\begin{aligned} \tau_{то} &= \tau_{то} + \tau_{тоi} + P_{замi} \tau_{замi}; \\ C_{то} &= C_{то} + C_{тоi} + P_{замi} C_{замi}. \end{aligned} \quad (8)$$

Оператор 9 завершує формування значень тривалості ТО $\tau_{\text{то}}$ і вартості ТО $C_{\text{то}}$ шляхом додавання до цих значень витрат часу та вартості на діагностування при проведенні ТО. Розглянутий алгоритм реалізує основний алгоритм імітаційно-статистична модель (ІСМ) у разі ТОС з фіксованою періодичністю контролю [3,4]. Результатом виконання такого алгоритму є наступне:

1. *Дія* – перепланування моментів часу відмов елементів, які зазнали ТО.
2. *Інформація* – тривалість ТО $\tau_{\text{то}}$ та витрати на ТО $C_{\text{то}}$.

Модель з адаптивною зміною періодичності контролю. Ідея ТОС з адаптивною зміною періодичності контролю полягає в наступному. У процесі експлуатації об'єкта проводиться накопичення і запам'ятовування інформації про властивості визначальних параметрів елементів. В якості основної характеристики визначального параметра $u_i(t)$ визначається середня швидкість деградації параметру $a_i(t)$, що виміряна в момент часу t :

$$a_i(t) = \frac{u_i(t) - u_i(t_{0i})}{t - t_{0i}}, \quad (9)$$

де $u_i(t)$ та $u_i(t_{0i})$ - значення визначального параметра i -го елемента в моменти часу t та t_{0i} відповідно;

t_{0i} - момент часу останнього відновлення (заміни) i -го елемента.

Будемо вважати, що як при відновленні, так і при ТО відбувається повне відновлення елемента, тобто $u_i(t_{0i}) = 0$.

Передбачається, що в технічному об'єкті є вбудована автоматизована система контролю, засобами якої здійснюється вимірювання визначальних параметрів $u_i(t)$, обчислюються оцінки середньої швидкості деградації параметрів $\tilde{a}_i(t)$ і збереження цих оцінок в довготривалій пам'яті системи. Оцінка $\tilde{a}_i(t_k)$ в деякий k -й момент часу виміру i -го параметра обчислюється за формулою експоненційного згладжування [5]:

$$\tilde{a}_i(t_k) = \beta \tilde{a}_i(t_{k-1}) + (1 - \beta) a_i(t_k), \quad (10)$$

де $\tilde{a}_i(t_{k-1})$ - оцінка швидкості, одержана в момент часу t_{k-1} ;

$a_i(t_k)$ - поточне значення середньої швидкості деградації i -го параметру, змінене в момент часу t_k ;

β - постійна згладжування ($\beta \in [0,1]$). Чим більше величина β , тим більша вага надається прогнозованим (априорним) значенням швидкості деградації визначальних параметрів.

Величина $a_i(t_k)$ обчислюється за вимірюваною в момент часу значення визначального параметра $u_i(t_k)$ за формулою:

$$a_i(t_k) = u_i(t_k) / (t_k - t_{0i}). \quad (11)$$

В процесі експлуатації, за накопиченням статистики, оцінка $\tilde{a}_i(t)$ наближається до істинного значення середньої швидкості деградації i -го параметру, що відповідає реальному рівню безвідмовності i -го елемента.

З урахуванням того, що ми використовуємо модель DN -розподілу, для оцінки $\tilde{a}_i(t)$ можна записати:

$$\tilde{a}_i(t) = 1/\tilde{T}_{cpi}(t), \quad (12)$$

де $\tilde{T}_{cpi}(t)$ - оцінка середнього наробітку до відмови i -го елемента, що визначається за накопиченої інформації вимірювань визначального параметра.

Чим тривалішою буде експлуатація об'єкта, тим ближче оцінка $\tilde{T}_{cpi}(t)$ буде наближатися до її істинного значення. Динамічно визначаємі оцінки $\tilde{T}_{cpi}(t)$ приймаються як прогноз на майбутній період часу $>t$. За отриманими оцінками середнього напрацювання до відмови елементів $\tilde{T}_{cpi}(t)$ можна розрахувати прогнозовану оцінку середнього наробітку до відмови об'єкта $\tilde{T}_{cp}(t)$. З урахуванням того, що використовується модель DN -розподілу наробітку до відмови, величина $\tilde{T}_{cp}(t)$ може бути розрахована як наведено у [5]. Наприклад, якщо всі елементи об'єкта з'єднані в сенсі надійності послідовно, то величина $\tilde{T}_{cp}(t)$ розраховується за виразом:

$$\tilde{T}_{cp}(t) = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tilde{T}_{cpi}(t)}}, \quad (13)$$

де n – кількість елементів об'єкта.

Якщо в поточний момент часу t_k була одержана оцінка $\tilde{T}_{cp}(t)$, тоді час до слідуєчого ТО $\tilde{T}_{то}$ визначається за виразом:

$$\tilde{T}_{то} \tilde{T}_{то}(t_k) = \gamma \tilde{T}_{cp}(t_k), \quad (14)$$

де γ - коефіцієнт випередження, оптимальна величина якого визначається в результаті моделювання.

Шляхом вибору величини коефіцієнта γ оптимізуються витрати на експлуатацію та забезпечення необхідного рівня безвідмовності об'єкта.

На рис. 2 зображена структурна схема алгоритму, яким моделюється розглянутий процес з адаптивною зміною періодичності контролю.

Структура цього алгоритму в цілому така ж, як і у алгоритму моделювання з фіксованою періодичністю контролю (рис.1). Тому розглянемо тільки оператори, відмінні від операторів алгоритму рис. 3.6.

Оператор 3 визначає вимірне поточне значення середньої швидкості деградації визначального параметра i -го елемента $a_i(t)$ за формулою (11).

Оператор 8 виробляє обчислення нового значення накопиченої оцінки $\tilde{a}_i(t)$ за формулою (12). Одержане нове значення $\tilde{a}_i(t)$ зберігається в довготривалій пам'яті системи.

Оператор 12 проводить розрахунок часу до наступного ТО за формулою (14).



Рис. 2. Алгоритм моделювання ТОС з адаптивними змінами періодичності контролю

Далі слід перейти до моделювання процесу регламентованого ТО. Суть стратегії регламентованого ТО полягає у тому, що проводяться в заздалегідь заплановані моменти часу з заданим фіксованим обсягом робіт. При цьому терміни та обсяг робіт ТО не залежать від фактичного технічного стану об'єкта. Таке моделювання буде здійснено у подальшому.

Висновки.

1. Розроблена ІСМ, призначена для прогнозування показників надійності і вартості експлуатації складного технічного об'єкта озброєння, що залежать від параметрів обраної стратегії. В ній реалізовані алгоритми імітації процесів ТО для двох варіантів стратегій:

- ТОС з постійною періодичністю контролю;
- ТОС з адаптивно періодичністю контролю;

2. Режим моделювання регламентованого ТО введений з метою забезпечення повноти аналізу можливих стратегій ТО проектного об'єкта і прогнозування можливого виграшу в надійності і вартості експлуатації об'єкта за рахунок застосування наведених стратегій ТОС.

3. Методична точність ІСМ визначається наступними факторами:

- вихідної надійністю об'єкта (заданими показниками надійності елементів);
- кількість реалізацій (тривалістю) моделювання;
- заданою тривалістю експлуатації об'єкта.

4. З наведених факторів найбільш істотним є перший. У більшості практично цікавих випадків відносна помилка результатів моделювання не перевищує 10-20%.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ленков Є.С. Узагальнена математична модель процесу технічного обслуговування і ремонту складної техніки / Є.С. Ленков // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. - Хмельницький, 2017. - №2. - С. 186 – 191.
2. Ленков С.В. Формалізована методика оптимізації параметрів стратегії технічного обслуговування за ресурсом складних виробів тривалої експлуатації / С.В. Ленков, Є.С.Ленков // Журнал «Сучасна спеціальна техніка». – Київ, 2016. – 4(47). – С.3 – 8.
3. Моделирование процесса технического обслуживания «по состоянию» сложного восстанавливаемого объекта РЭТ / Банзак Г.В., Борjak К.Ф., Ленков Є.С., Селюков А.В. // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2010. – № 29. – С.4–9.
4. Ленков Є.С. Аналіз математичних моделей технічного обслуговування складних технічних об'єктів / Г.Б. Жиров, Є.С. Ленков // Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління». – Івано-Франківськ, 2017. – С.205 – 206.
5. Forecasting to reliability complex object radio-electronic technology and optimization parameter their technical usage with use the simulation statistical models: [monography] in English / Sergey Lenkov, Konstantin Borjak, Gennady Banzak, Vadim Braun, etc.; under edition S. V. Lenkov. – Odessa: Publishing house «ВМВ», 2014. – 252 p.

REFERENCES:

1. Ljenkov Je.S. (2017). Uzagal'nena matematychna model' procesu tehničnogo obslugovuvannja i remontu skladnoi' tehniky. *Visnyk Hmel'nyc'kogo nacional'nogo universytetu*. Hmel'nyc'kyj. № 2. 186 – 191.
2. Ljenkov S.V., Ljenkov Je.S. (2016). Formalizovana metodyka optymizacii' parametriv strategii' tehničnogo obslugovuvannja za resursom skladnyh vyrobiv tryvaloi' ekspluatacii'. *Zhurnal "Suchasna special'na tehnika"*. Kyi'v. 4(47). 3 – 8.
3. Banzak G.V., Borjak K.F., Lenkov E.S., Seljukov A.V. (2010) Modelirovanie processa tehničeskogo obsluzhivanija "po sostojanju" slozhnogo vosstanavlivaemogo ob#ekta RJeT. *Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka*. Kyi'v. № 29. 4–9.
4. Zhyrov G.B., Ljenkov Je.S. Analiz matematychnyh modelej tehničnogo obslugovuvannja skladnyh tehničnyh ob'ektiv. *Mizhnarodna naukovo-tehnična konferencija studentiv, aspirantiv ta molodyh vchenyh "Kompjutersni nauky, informacijni tehnologii' ta systemy upravlinnja"*. Ivano-Frankivs'k. 205-206.
5. Forecasting to reliability complex object radio-electronic technology and optimization parameter their technical usage with use the simulation statistical models: [monography] in English / Sergey Lenkov, Konstantin Borjak, Gennady Banzak, Vadim Braun, etc.; under edition S. V. Lenkov. – Odessa: Publishing house «ВМВ», 2014. – 252 p.

Рецензент: к.т.н., с.н.с. Жиров Г.Б., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру, Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Бондаренко Т.В., к.т.н. Ленков Е.С.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ
С ФИКСИРОВАННОЙ И АДАПТИРОВАННОЙ ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ КОНТРОЛЯ
СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВООРУЖЕНИЯ**

В статье представлена имитационно-статистическая модель, которая предназначена для прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации сложного технического объекта вооружения, которые зависят от параметров выбранной стратегии. В ИСМ реализованы алгоритмы имитации процессов для двух вариантов стратегий: с постоянной периодичностью контроля и с адаптивной периодичностью контроля. Режим моделирования регламентированного ТО введен с целью обеспечения полноты анализа возможных стратегий ТО проектируемого объекта и прогнозирования возможного выигрыша в надежности и стоимости эксплуатации объекта за счет применения следующих стратегий.

Методическая точность модели определяется следующими факторами: исходной надежностью объекта; количеством реализаций (продолжительностью) моделирование; заданной продолжительности эксплуатации объекта.

Ключевые слова: моделирование, техническое обслуживание, сложные технические средства вооружения.

Bondarenko T.V., Ph.D. Lenkov E.S.

MODELING OF MAINTENANCE AS FIXED PERIODICITY AND ADAPTED CONTROL OF WEAPONS COMPLEX TECHNICAL

The article presents a simulation-statistical model, which is intended for forecasting of indicators of reliability and cost of maintenance of complex technical object weapons, which depend on the parameters of the chosen strategy. In IMS implemented algorithms simulate processes of two options strategies: with constant frequency control, and adaptive frequency control. The simulation mode is regulated by THE entered to ensure completeness of the analysis of the possible strategies THAT the designed object and predicting the possible gain in reliability and cost of operation of the facility through the use of the following strategies.

Methodological accuracy of the model is determined by the following factors: source reliability facility; a number of implementations (duration) simulation; given the duration of operation of the facility.

Keywords: modeling, maintenance, complex technical weapons.