



## МОРОЗОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

*доктор технічних наук, професор,  
головний науковий співробітник науково-методичного центру  
організації та проведення освітньої діяльності  
Національного університету оборони України  
<https://orcid.org/0000-0002-1352-1783>*

### СПОСОБИ КОРИГУВАННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ТРИВАЛІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*У статті розглянуто способи коригування періодичності технічного обслуговування складних технічних систем із тривалим терміном експлуатації. Способи коригування періодичності технічного обслуговування враховують зниження надійності складних систем та, як наслідок, зростання тривалості їх вимушених простоїв через технічні обслуговування та необхідність усунення відмов та несправностей. Запропоновано математичні моделі простою складних технічних систем через технічне обслуговування залежно від щільності потоку відмов та швидкості усунення відмов та несправностей, економічних показників експлуатації. Отримано вирази для розрахунку періодичності технічного обслуговування та оптимально-го простою через технічне обслуговування складних технічних систем, реалізація яких забезпечить підтримку їх придатності до використання за призначенням.*

**Ключові слова:** складні технічні системи; технічне обслуговування; напрацювання; старіння; надійність; оптимізація; періодичність та тривалість технічного обслуговування.

**Постановка проблеми.** Підтримання справного стану та придатності до використання за призначенням складних технічних систем (далі – СТС) забезпечується відповідними системами технічного обслуговування (далі – ТО) та ремонту. Це переважно системи, що реалізують планово-попереджувальні стратегії (далі – ППС) технічного обслуговування та ремонту, або моделі ТО та ремонту за станом системи [1]. У більшості СТС з тривалими термінами експлуатації зазвичай реалізовано ППС, які передбачають призначення незмінних видів, періодичності та тривалості робіт з їх обслуговування залежно від напрацювання [2]. Вимушені простої СТС через проведення планових обслуговувань, а також усунення відмов та несправностей їх механізмів, вузлів та агрегатів (далі – підсистем) знижують загальний час їх використання за призначенням, рентабельність експлуатації.

У процесі тривалої експлуатації СТС їх підсистеми піддаються постійному впливу експлуатаційних факторів, що змінюють їх технічний стан. Стохастичний характер впливу експлуатаційних факторів на їх підсистеми призводять до того, що при одному і тому самому напрацюванні або тривалості експлуатації однотипні системи можуть мати різний

фактичний стан і напрацювання або календарний термін служби не може однозначно характеризувати їх технічний стан [3]. Для підтримання заданого рівня надійності СТС, зниження часу їх вимушеного простою через проведення ТО та ремонту необхідно коригувати періодичність та тривалість проведення їх технічного обслуговування так, щоб забезпечувати (підтримувати) заданий рівень їх надійності та запобігати їх відмовам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових публікацій показує, що в задачах визначення (коригування) оптимальної періодичності проведення ТО складних технічних систем як основні можна зазначити методики визначення параметрів технічного обслуговування за станом, за ресурсом та адаптивного ТО [4; 5; 6; 7]. При цьому більшість статей присвячено одній із важливих і остаточно не розв'язаних задач – забезпеченню надійності експлуатації СТС звичайної та високої відповідальності [8; 9], систем з високою надійністю та зі збільшеними періодичностями технічного обслуговування [10; 11]. Для сучасних СТС шукана задача формулюється та вирішується для стратегій ТО та ремонту за технічним станом [7; 10]. При цьому розв'язання означених задач ґрунтується на таких

підходах: періодичність проведення ТО складних ТЗ визначається шляхом формування переліку робіт з обслуговування їх підсистем; роботи з обслуговування підсистем групуються у певні види ТО; використовуються критерії оптимальності процесу технічної експлуатації, коефіцієнти технічного використання; економічний підхід (оцінювання економічних наслідків вимушених простоїв). При цьому зазвичай експлуатацію СТЗ розглядають для умов експоненційного розподілу потоку відмов із постійною величиною щільності потоку відмов [12]. Меншою мірою розглядаються та формулюються задачі коригування періодичності проведення ТО систем з урахуванням збільшення потоку відмов через старіння.

**Мета статті** – розробити способи коригування періодичності проведення технічного обслуговування, які забезпечували б збереження (підтримання) ефективності та якості функціонування СТС з урахуванням їх старіння.

**Виклад основного матеріалу.** Тривала експлуатація будь-якої складної технічної системи супроводжується зростанням інтенсивності відмов та необхідністю проведення профілактичних заходів, що компенсують деградацію стану підсистем, збільшенням часу вимушеного простою системи через необхідність усунення відмов та несправностей.

Для розв'язання поставленої задачі розглянемо кілька можливих математичних моделей простою СТС та на їх основі запропонуємо способи отримання скоригованих (уточнених) періодичностей або кількості технічних обслуговувань з урахуванням зниження надійності їх підсистем та системи в цілому.

**Модель ТО № 1.** Повний час вимушеного простою СТС через технічне обслуговування можна визначити як функцію від числа виконаних обслуговувань:

$$T_{\Pi} = n \cdot \bar{T}_{\text{ТО}} + \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{n}, \quad (1)$$

де  $T_{\Pi}$  – повний (сумарний) час простою СТС за певний період часу;

$n$  – кількість виконаних ТО за певний період часу;

$\bar{T}_{\text{ТО}}$  – середній або плановий час простою СТС через виконання обслуговування за певний період часу;

$k$  – постійний коефіцієнт, пов'язаний зі специфікою обслуговування СТС, що враховує простой через усунення несправностей;

$T_{\text{В}}$  – час відновлення СТС через відмови її підсистем за певний період.

Введемо такі обмеження: функція  $T_{\Pi} = f(n)$  безперервна і обмежена областю  $t_{\text{ПС}} < t < t_{\text{ЖЦ}}$ , де

$t$  – напрацювання системи у процесі експлуатації,  $t_{\text{ПС}}$  – початок старіння,  $t_{\text{ЖЦ}}$  – тривалість життєвого циклу складної ТС.

Для визначення оптимуму (мінімуму) функції  $T_{\Pi} = f(n)$  знайдемо її екстремум. Для цього, диференціюючи функцію (1) щодо  $n$ , отримаємо:

$$\frac{dT_{\Pi}}{dn} = \bar{T}_{\text{ТО}} - \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{n^2}, \quad (2)$$

Відповідно до теореми існування та єдності задачі Коші диференціальне рівняння (2) має єдине рішення оптимальної кількості періодичних ТО старіючих складних технічних систем [13]:

$$\bar{T}_{\text{ТО}} - \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{n^2} = 0, \quad (3)$$

Вирішуючи рівняння (3) відносно кількості ТО, отримуємо:

$$n^2 = \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{\bar{T}_{\text{ТО}}}.$$

Звідси оптимальна кількість обслуговувань СТС:

$$n^{\text{opt}} = \left( \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{\bar{T}_{\text{ТО}}} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де  $n^{\text{opt}}$  – оптимальна кількість ТО складної технічної системи для підтримання її придатності до використання за призначенням за певний період.

Підставляючи вираз (4) до виразу (1), отримуємо:

$$T_{\Pi}^{\text{opt}} = \left( \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{\bar{T}_{\text{ТО}}} \right)^{1/2} \bar{T}_{\text{ТО}} + \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{\left( \frac{k \cdot T_{\text{В}}}{\bar{T}_{\text{ТО}}} \right)^{1/2}}.$$

Після перетворення отримуємо формулу для розрахунку повного оптимального часу простою СТС для підтримання її придатності до використання за призначенням за певний період:

$$T_{\Pi}^{\text{opt}} = 2 \left( k \cdot \bar{T}_{\text{ТО}} \cdot T_{\text{В}} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

де  $T_{\Pi}^{\text{opt}}$  – повний оптимальний час простою СТС для підтримання придатності до використання за призначенням за певний період.

Розглянемо вплив надійності СТС на загальний час їх простою через обслуговування та оптимізацію періодичності ТО. Для цього складемо оптимізаційну модель надійності та середнього часу простою системи для підтримання її придатності до використання за призначенням.

Прийmemo такі правила та обмеження для оптимізаційної моделі:

– підсистеми СТС, що відмовили, замінюються справними;

– технічне обслуговування СТС виконується через кожні  $\Delta t$  годин, відрахованих від початкового часу після останнього її капітального ремонту.

Для технічного обслуговування інтервали часу ТО запишемо як:

$$t = t_i + \Delta t, \text{ при } i = 0, 1, 2, \dots; 0 \leq \Delta t < t_i, \quad (6)$$

де  $t$  – поточне напрацювання підсистем СТС (у годинах);  $t_i$  – час настання  $i$ -го обслуговування;  $i$  – номер ТО,  $0$  – нульове обслуговування після визначення ефекту старіння;  $\Delta t$  – період часу між обслуговуваннями СТС, виражений у напрацюванні в годинах.

Для  $i = 1$  та  $\Delta t = 0$  підтримка придатності системи до використання за призначенням забезпечується технічним обслуговуванням з оптимальною періодичністю  $\Delta t^{\text{opt}}$ .

Надійність СТС запишемо у вигляді наступної рівності:

$$R_t(t = \Delta t^{\text{opt}}) = R(T^{\text{opt}}), \quad (7)$$

де  $\Delta t^{\text{opt}}$  – оптимальний проміжок часу між обслуговуваннями СТС;  $T^{\text{opt}}$  – оптимальна періодичність ТО;  $R(T^{\text{opt}})$  – надійність СТС при оптимальній періодичності технічного обслуговування.

При збільшенні періодичності обслуговування зменшується надійність складної технічної системи і для  $t = 2\Delta t^{\text{opt}}$  та  $\Delta t = 0$  маємо:

$$R_t(t = 2\Delta t^{\text{opt}}) = [R(T^{\text{opt}})]^2, \quad (8)$$

У цьому випадку СТС використовується в перші години  $\Delta t^{\text{opt}}$  без відмов та несправностей. Далі протягом інших годин  $\Delta t^{\text{opt}}$  система використовується за призначенням після того, як будуть усунені відмови і несправності під час  $t_i$ .

При напрацюванні  $0 < t_i < \Delta t^{\text{opt}}$  система безвідмовно використовується за призначенням. Отже, надійність СТС забезпечується її обслуговуванням через оптимальний проміжок часу  $\Delta t^{\text{opt}}$ :

$$R_t(t = 2\Delta t^{\text{opt}} + t_i) = [R(T^{\text{opt}})]^2 R(t_i), \quad (9)$$

У загальному вигляді рівняння (8) набуде вигляду:

$$R_i(t = t_i + \Delta t^{\text{opt}}) = [R(T^{\text{opt}})]^i R(T^{\text{opt}}), \text{ для } i = 0, 1, 2, \dots; 0 \leq t_i < \Delta t^{\text{opt}}, \quad (10)$$

Середня періодичність ТО означає періодичність часу усунення несправностей та виконання періодичного технічного обслуговування для підтримки придатності СТС до використання за призначенням:

$$\bar{T}_{\text{ТО}} = \int_0^{\infty} R_t(\Delta t^{\text{opt}}) dt, \quad (11)$$

Оцінюючи рівняння (11), запишемо складовий період діапазону  $t_{\text{пт}} < t < t_{\text{жц}}$ , так:

$$\bar{T}_{\text{ТО}} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} R_t(t) dt, \quad (12)$$

У рівнянні (12), складеному з рівняння (11), інтервали часу поділено на довжини  $\Delta t$ .

Для часу  $t = t_i + \Delta t$ , замінюючи у рівнянні (12) надійність рівнянням (10), отримуємо:

$$\bar{T}_{\text{ТО}} = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{\Delta t^{\text{opt}}} [R(T^{\text{opt}})]^i R(T^{\text{opt}}) dt, \quad (13)$$

У рівнянні (12) для часу  $t = t_i + \Delta t$ ,  $dt = dt_i$  межі стануть  $0$  і  $\Delta t^{\text{opt}}$ .

Отже, перебудовуючи рівняння (13), отримуємо:

$$\bar{T}_{\text{ТО}} = \sum_{i=0}^{\infty} [R(T^{\text{opt}})]^i R(T^{\text{opt}}) dt, \quad (14)$$

Відколи:

$$\sum_{i=0}^{\infty} [R(T^{\text{opt}})]^i = \frac{1}{1 - R(T^{\text{opt}})}, \quad (15)$$

рівняння (13) набуває такого вигляду:

$$\bar{T}_{\text{ТО}}^{\text{opt}} = \frac{\int_0^{\Delta t^{\text{opt}}} R(T^{\text{opt}}) d\Delta t^{\text{opt}}}{1 - R(T^{\text{opt}})}, \quad (16)$$

де  $\bar{T}_{\text{ТО}}^{\text{opt}}$  – оптимальний плановий час простою для підтримання придатності СТС при оптимальній періодичності ТО за певний період часу;  $\Delta t^{\text{opt}}$  – оптимальний період часу між технічними обслуговуваннями СТС;  $R(T^{\text{opt}})$  – надійність СТС за оптимальної періодичності технічного обслуговування.

Отже, потреба у підвищенні надійності складної технічної системи задає час її простою на підтримання придатності до використання за призначенням.

Використовуючи дані щодо надійності СТС та знаючи розподіл середнього часу напрацювання на відмову, можна визначити середню періодичність ТО старіючих систем для підтримання їхньої придатності до використання за призначенням.

**Модель ТО №2.** Модель можна використовувати, щоб визначити оптимальну періодичність обслуговування СТС і мінімізувати час їх вимушеного простою через обслуговування.

У цій оптимізаційній моделі повний час простою є функцією часу напрацювання СТС чи частоти технічних обслуговувань. Математично ця оптимізаційна модель визначається такою функцією:

$$T_{\Pi}(t) = \bar{T}_{\text{ТО}}(t) + T_{\text{В}}(t) = \frac{t}{\theta} + \frac{\lambda(t)}{\mu}, \quad (17)$$

де  $T_{\Pi}(t)$  – загальний час простою СТС в одиницю часу;  $\bar{T}_{\text{ТО}}(t)$  – час простою СТС через виконання технічного обслуговування в одиницю часу;  $T_{\text{В}}(t)$  – час простою СТС через усунення відмов та несправностей в одиницю часу;  $t$  – напрацювання СТС;  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов та несправностей СТС;  $\mu$  – швидкість усунення відмов та несправностей;

$1/\Theta$  – коефіцієнт середньої тривалості технічного обслуговування (відношення середньої тривалості ТО до його періодичності, тобто,  $1/\Theta = \bar{T}_{\text{ТО}}/\Delta t$ , де  $\Delta t$  – період між технічними обслуговуваннями системи).

Диференціюючи функцію (17) щодо  $t$ , отримуємо:

$$\frac{dT_{\Pi}(t)}{dt} = \frac{1}{\Theta} + \frac{d\lambda(t)}{d(t_i)} \cdot \frac{1}{\mu}, \quad (18)$$

Необхідна умова екстремуму функції (18) дає такі результати:

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = -\frac{\mu}{\Theta}, \quad (19)$$

Періодичність технічного обслуговування буде оптимальною, коли ліві та праві сторони формули (19) дорівнюватимуть. При цьому час простою СТС буде мінімальним.

Прийемо, що щільність потоку відмов СТС визначається формулою [12]:

$$\lambda(t) = f \cdot e^t, \quad (20)$$

де  $f$  – функція інтенсивності відмов СТС при  $t = 0$ .

Замінюючи у формулі (19) інтенсивність відмов із формули (20), отримуємо:

$$f \cdot e^t = -\frac{\mu}{\Theta}, \quad (21)$$

Отже, рівність (21) дає формулу для обчислення оптимальної періодичності технічного обслуговування СТС:

$$\Delta t^{\text{opt}} = \ln \left[ \frac{f \cdot \Theta}{\mu} \right], \quad (22)$$

Підставляючи у формулу (22) замість функції інтенсивності відмов  $f$  вираз  $\lambda(t)/e^t$ , отримуємо:

$$\Delta t^{\text{opt}} = \ln \left[ \frac{\lambda(t) \cdot \Theta}{\mu \cdot e^{-t}} \right], \quad (23)$$

де  $\Delta t^{\text{opt}}$  – оптимальна періодичність проведення ТО;  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов та несправностей СТС;  $\mu$  – швидкість відновлення відмов та несправностей,  $1/\Theta$  – коефіцієнт середньої тривалості ТО.

**Модель ТО №3.** Якщо СТС обслуговується за надто часто, є небезпека, що ТО може бути дорожчим через такі фактори, як втрата виробничого використання, збільшення витрат на експлуатаційні матеріали та заробітну плату, ніж втрати через її простої на усунення несправностей при рідкісному обслуговуванні. Ця модель ТО впливає з умов забезпечення максимального прибутку під час експлуатації СТС [2].

У моделі будемо використовувати такі правила та обмеження: працездатність системи відновлюється

при кожному ТО; інтенсивність відмов підсистем СТС та функція технічного обслуговування величини постійні; час ТО та усунення несправностей розподілено за експоненційним законом; розподіл несправностей та швидкості відновлення СТС – постійні величини.

Для розвитку рівнянь моделі ТО використаємо такі позначення:  $n$  – кількість технічних обслуговувань, виконаних за одиницю часу;  $1/\Theta$  – середня тривалість технічного обслуговування;  $C_{\text{прб}}$  – прибуток від експлуатації СТС без урахування часу її простою через проведення ТО в одиницю часу;  $\bar{C}_{\text{ТО}}$  – середня вартість технічного обслуговування СТС в одиницю часу;  $\bar{C}_{\text{В}}$  – середня вартість усунення відмов та несправностей СТС в одиницю часу;  $\lambda(t)$  – інтенсивність виникнення відмов та несправностей СТС;  $\mu$  – швидкість усунення відмов та несправностей.

Прибуток від експлуатації СТС визначається такою формулою:

$$C_{\text{прб}} = C_{\text{дх}} - C_{\text{прс}} \cdot \bar{T}_{\text{ТО}} - C_{\text{прс}} \cdot \bar{T}_{\text{В}} - \bar{C}_{\text{ТО}} - \bar{C}_{\text{В}} = \\ = C_{\text{дх}} - \frac{C_{\text{прб}}^{\text{пл}} \cdot n}{\Theta} - \frac{C_{\text{прб}}^{\text{пл}} \cdot \lambda(t)}{\mu} - \frac{n \cdot S_{\text{ТО}}}{\Theta} - \frac{S_{\text{В}} \cdot \lambda(t)}{\mu}, \quad (24)$$

де  $C_{\text{дх}}$  – доходи від експлуатації СТС;  $C_{\text{прс}}$  – вартість однієї години простою СТС;  $\bar{T}_{\text{ТО}}$  – простій ТС через проведення технічного обслуговування;  $\bar{T}_{\text{В}}$  – простій СТС через усунення відмов та несправностей;  $S_{\text{ТО}}$  – середня вартість проведення ТО;  $\bar{C}_{\text{В}}$  – середня вартість усунення відмов та несправностей;  $S_{\text{В}}$  – витрати на кожне усунення відмов та несправностей;  $C_{\text{прб}}^{\text{пл}}$  – плановий прибуток від використання СТС за призначенням, грн/рік напрацювання системи.

Диференціюючи (24) щодо  $n$ , отримуємо:

$$\frac{dC_{\text{прб}}}{dn} = -\frac{C_{\text{прб}}^{\text{пл}}}{\Theta} - \frac{C_{\text{прб}}^{\text{пл}} \cdot d\lambda(t)}{\mu dn} - \frac{S_{\text{ТО}}}{\Theta} - \frac{S_{\text{В}} \cdot d\lambda(t)}{\mu dn}, \quad (25)$$

Прирівнювання виразу (25) до нуля та подальші перетворення дають таку рівність:

$$\frac{d\lambda(t)}{dn} = -\left[ \frac{1}{\Theta} (C_{\text{прб}}^{\text{пл}} + S_{\text{ТО}}) \right] / \left( \frac{C_{\text{прб}}^{\text{пл}}}{\mu} + \frac{S_{\text{В}}}{\mu} \right), \quad (26)$$

Кількість технічних обслуговувань СТС  $n$  буде оптимальною, коли обидві сторони формули (26) рівні. У цьому випадку прибуток буде максимальним.

Припустимо, що інтенсивність появи несправностей СТС визначається формулою (20). Підстановка формули (20) у формулу (26) дає таку рівність:

$$-f \cdot e^t = -\left[ \frac{1}{\Theta} (C_{\text{прб}}^{\text{пл}} + S_{\text{ТО}}) \right] / \left( \frac{C_{\text{прб}}^{\text{пл}}}{\mu} + \frac{S_{\text{В}}}{\mu} \right), \quad (27)$$

Перетворивши вираз (26), отримуємо:

$$n^{opt} = \ln \left[ \frac{\lambda(t) \cdot \Theta \cdot (C_{прб}^{пл} + S_{ТО})}{\mu \cdot e^{-t} \cdot (C_{прб}^{пл} + S_B)} \right], \quad (28)$$

де  $n^{opt}$  – оптимальна кількість технічних обслуговувань СТС за певний період часу;  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов СТС;  $S_{ТО}$  – витрати на кожне технічне обслуговування СТС;  $S_B$  – витрати на кожне усунення відмови та несправності СТС;  $C_{прб}^{пл}$  – плановий прибуток від використання СТС за призначенням, грн./рік. напрацювання системи.

Ця модель може використовуватися для обчислення оптимальної періодичності технічного обслуговування СТС, за якою буде досягтися максимальний прибуток від їх експлуатації.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Підтримання заданого рівня надійності та придатності до використання старіючих складних технічних систем, в яких реалізовано планово-попереджувальні стратегії технічного обслуговування та ремонту, потребує дослідження проблеми коригування параметрів ТО – кількості та тривалості обслуговувань.

Для розв'язання таких задач необхідно розробляти моделі простою СТС, які б враховували вплив їх надійності на загальний час простою.

Розроблено моделі простою старіючих складних технічних систем та отримано розрахункові формули для визначення оптимальних кількості та тривалості їх технічного обслуговування.

Новизна проведеного дослідження полягає у тому, що для багатьох складних технічних систем тривалого використання потрібно проведення робіт з підтримання їх придатності до експлуатації через скорочення періодичності обслуговування, проведення робіт з оцінювання стану таких систем.

Подальші дослідження може бути спрямовано на вдосконалення обслуговування складних технічних систем при тривалій експлуатації.

#### Список використаних джерел

1. Россомха О. І. Концептуальна модель системи технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем. *Розвиток транспорту*. 2020. № 1(6). С. 56–70. DOI: 10.33082/td.2020.1-6.05.
2. Севостьянов І. В. Теорія технічних систем : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2014. 181 с.
3. Сахно В. П., Іванушко О. М. Вплив умов експлуатації та системи технічного обслуговування і ремонту на технічний стан автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія: Технічні науки*. 2017. № 1 (37). С. 363–372.

4. Опенько П. В., Поліщук В. В., Миронюк М. Ю., Козир А. Г. Досвід застосування адаптивних стратегій технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки в державах-членах НАТО. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2021. № 2 (8). С. 101–111.

5. Воронін В., Бурцев В., Коломійцев О., Демченко М., Старцев В., Третяк В., Кулешов О., Клівець С., Приходько С., Кудря І. Впровадження планово-попереджувальної стратегії технічного обслуговування і ремонту для модернізованих зразків зенітного ракетного озброєння. *Scientific Collection «InterConf+»*. 2024. № 42(189). С. 656–671.

6. Кривцун В. І., Нагачевський В. Й., Баранов А. М. Порівняльний аналіз існуючих систем технічного обслуговування і ремонту машин інженерного озброєння. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 33–45.

7. Банзак Г. В., Банзак О. В., Лещенко О. І. Порівняльне дослідження різних стратегій технічного обслуговування. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2015. № 1(6). С. 111–118.

8. Ленков С. В., Зінчик А. Г., Ленков Е. С., Бондаренко Т. В. Порівняння ефективності методик оптимізації параметрів стратегії технічного обслуговування складних об'єктів техніки. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2022. № 71. С. 11–21.

9. Матусевич О. О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій : монографія. Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. 295 с.

10. Могилевич Д. І., Долженко Г. В. Аналіз стану системи технічного обслуговування електронного комунікаційного обладнання мережі спеціального призначення. *Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки*. 2024. № 5. С. 101–107.

11. Павлов Д. Методика визначення часу проведення технічного обслуговування зразків військової автомобільної техніки при діючій системі експлуатації. *Journal of Scientific Papers Social Development and Security*. 2021. Vol. 11. № 4. С. 123–128.

12. Семенюк А. А. Алгоритм оптимізації надійності технічних систем керування з використанням імовірнісного моделювання. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2000. Том 5. № 3. С. 118–123.

13. Самойленко А. М., Кривошея С. А., Перестюк М. О. Диференціальні рівняння (у прикладах і задачах) : навч. посіб. Київ : Вища школа, 1994. 453 с.

## References

1. Rossomakha, O. I. (2020). *Kontseptualna model systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu skladnykh tekhnichnykh system* [Conceptual model of the maintenance and repair system of complex technical systems]. *Rozvytok transportu*. No 1(6). С. 56–70. DOI: 10.33082/td.2020.1-6.05 [in Ukrainian].
2. Sevostianov, I. V. (2014). *Teoriia tekhnichnykh system : pidruchnyk*. Vinnytsia : VNTU. 181 p. [in Ukrainian].
3. Sakhno, V. P., Ivanushko O. M. (2017). *Vplyv umov ekspluatatsii ta systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu na tekhnichni stan avtotransportnykh zasobiv* [The influence of operating conditions and maintenance and repair systems on the technical condition of motor vehicles]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu Seriya: Tekhnichni nauky*. No 1 (37). pp. 363–372. [in Ukrainian].
4. Openko, P. V., Polishchuk, V. V., Myroniuk, M. Iu., Kozyr, A. H. (2021). *Dosvid zastosuvannya adaptivnykh stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki v derzhavakh-chlenakh NATO* [Experience in applying adaptive strategies for the maintenance and repair of weapons and military equipment in NATO member states]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo naukovodooslidnoho instytutu viprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*. No 2 (8). pp. 101–111. [in Ukrainian].
5. Voronin, V., Burtsev, V., Kolomiitsev, O., Demenko, M., Startsev, V., Tretiak, V., Kulieshov, O., Klivets, S., Prykhodko, S., Kudria, I. (2024). *Vprovadzhennia planovo-poperedzhuvalnoi stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu dlia modernizovanykh zrazkiv zenitnoho raketnoho ozbroiennia* [Implementation of a planned and preventive maintenance and repair strategy for modernized models of anti-aircraft missile weapons]. *Scientific Collection «InterConf+»*. No 42(189). pp. 656–671. [in Ukrainian].
6. Kryvtsun, V. I., Nahachevskiy, V. I., Baranov, A. M. (2015). *Porivnialnyi analiz isnuichykh system tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu mashyn inzhenernoho ozbroiennia* [Comparative analysis of existing maintenance and repair systems for engineering weapons vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu*. No 1. pp. 33–45. [in Ukrainian].
7. Banzak, H. V., Banzak, O. V., Leshchenko, O. I. (2015). *Porivnialne doslidzhennia riznykh stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannya* [Comparative study of different maintenance strategies]. *Zbirnyk naukovykh prats Odeskoi derzhavnoi akademii tekhnichnoho rehuliuвання ta yakosti*. No 1(6). pp. 111–118. [in Ukrainian].
8. Lienkov, S. V., Zinchyk, A. H., Lienkov, E. S., Bondarenko, T. V. (2022). *Porivniannia efektyvnosti metodyk optymizatsii parametriv stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannya skladnykh ob'ektiv tekhniki* [Comparison of the effectiveness of methods for optimizing the parameters of the maintenance strategy for complex technical objects]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*. No 71. pp. 11–21. [in Ukrainian].
9. Matushevych, O. O. (2015). *Udoskonalennia metodolohii systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu tiahovykh pidstantsii* [Improving the methodology of the system of maintenance and repair of traction substations] : monohrafiia. Dnipropetrovsk : Dnipropetrovskiy natsionalnyi universytet zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 295 p. [in Ukrainian].
10. Mohylevych, D. I., Dolzhenko, H. V. (2024). *Analiz stanu systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya elektronnoho komunikatsiinoho obladdannia merezhi spetsialnoho pryznachennia* [Analysis of the state of the maintenance system of electronic communication equipment of a special-purpose network]. *Systemy i tekhnolohii zviazku, informatyzatsii ta kiberbezpeky*. No 5. pp. 101–107. [in Ukrainian].
11. Pavlov, D. (2021). *Metodyka vyznachennia chasu provedennia tekhnichnoho obsluhovuvannya zrazkiv viiskovoi avtomobilnoi tekhniki pry diiuchykh systemi ekspluatatsii* [Methodology for determining the time for technical maintenance of military automotive equipment samples under the current operation system]. *Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”*. Vol. 11. No 4. pp. 123–128 [in Ukrainian].
12. Semeniuk A. A. (2000) *Alhorytm optymizatsii nadiinosti tekhnichnykh system keruvannya z vykorystanniam imovirnisnoho modeliuвання* [Algorithm for optimizing the reliability of technical control systems using probabilistic modeling]. *Visnyk Ternopilskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu*. Vol. 5. Is. 3. pp. 118–123 [in Ukrainian].
13. Samoilenko, A. M., Kryvosheia, S. A., Perestiuk, M. O. (1994). *Dyferentsialni rivniannia (u prykladakh i zadachakh)* [Differential equations (in examples and problems)] : navch. posib. Kyiv : Vyshcha shkola, 453 p. [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції / Received: 11.04.2025

Прорецензовано / Revised: 21.04.2025

Схвалено до друку / Accepted: 30.04.2025

**Morozov Oleksandr**

Doctor of Technical sciences, professor,

Chief Researcher of the Scientific

and Methodological Center

for the Organization of Educational Activities

of the National Defense University of Ukraine

## METHODS OF ADJUSTING THE PERIOD OF TECHNICAL MAINTENANCE OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS DURING LONG-TERM OPERATION

*The article proposes methods for adjusting the maintenance frequency of complex technical systems with a long service life. Methods for adjusting the maintenance frequency take into account the decrease in the reliability of complex systems and, as a result, the increase in the duration of their forced downtime due to maintenance and the need to eliminate failures and malfunctions. Mathematical models of downtime of complex technical systems due to maintenance are proposed depending on the density of the failure flow and the speed of eliminating failures and malfunctions, economic indicators of operation. Expressions are obtained for calculating the maintenance frequency and optimal downtime due to maintenance of complex technical systems, the implementation of which will ensure their suitability for use for their intended purpose.*

*The purpose of the article is to develop methods for adjusting the frequency of technical maintenance and, as a result, preserving (maintaining) the efficiency and quality of the functioning of the STS, taking into account their aging.*

*To solve the formulated problem, classical mathematical probability theory, the theory of differential equations and renewal theory were used.*

*Before the main results, three models can be summarized that describe the problems of simple folding technical systems through their technical maintenance and elimination of faults and problems. Two of the installed models allow you to restore the reliability of the STS for the last hour of their downtime. Based on data on the*

*reliability of systems and knowing the distribution of the average hour of work on the device, it is possible to calculate the average frequency of maintenance of older systems to maintain their availability up to using for recognition. The third model allows us to calculate the optimal frequency of maintenance of folding technical systems in order to achieve the maximum profit from their operation.*

*The novelty of the research is that many complex technical systems of long-term use require work to maintain their operability by reducing the frequency of maintenance and carrying out work to assess the condition of such systems.*

*Maintaining a given level of reliability and usability of aging complex technical systems, in which planned and preventive maintenance and repair strategies are implemented, requires studying the problem of adjusting maintenance parameters - the number and duration of maintenance.*

*To solve such problems, it is necessary to develop models of downtime of STS that would take into account the impact of their reliability on the total downtime.*

*Models of downtime of aging complex technical systems have been developed and calculation formulas have been obtained to determine the optimal number and duration of their maintenance.*

*The novelty of the research is that for many complex technical systems of long-term use, it is necessary to carry out work to maintain their usability by reducing the frequency of maintenance, and to carry out work to assess the condition of such systems.*

**Keywords:** *collapsible technical systems; technical maintenance; specification; antiquity; reliability; optimization; frequency and triviality of technical maintenance.*