

УДК: 623.486:658.58:519.87

DOI: 10.33099/2311-7249/2026-55-1-56-64

КОНДРАТЮК Ігор Володимирович,

доктор філософії,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0001-9408-1435>

ВЕРЕТНОВ Андрій Олександрович,

кандидат технічних наук,
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-0160-7325>

ІЛЬІН Дмитро Володимирович,

доктор філософії,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-5967-0151>

ЧУРІЛОВ Ігор Олександрович,

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0009-0003-9627-3221>

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

У статті розглянуто науково-прикладну задачу підвищення ефективності експлуатації зразків озброєння та військової техніки шляхом оптимізації періодичності їх відновлення за технічним станом в умовах інтенсивного бойового застосування. Показано необхідність переходу від планово-попереджувальної системи технічного обслуговування і ремонту до експлуатації за технічним станом. **Метою статті** є розроблення методичного підходу до визначення раціональної періодичності відновлення зразків озброєння та військової техніки на основі мінімізації середніх питомих витрат з урахуванням деградації технічного стану, контролю працездатності та відновлювальних заходів.

Методи дослідження. Під час проведення дослідження застосовано методи системного аналізу, теорії випадкових процесів, напівмарківського моделювання та техніко-економічного аналізу, що дало змогу формалізувати процес функціонування зразка військової техніки та визначити залежність витрат від періодичності відновлення.

Отримані результати дослідження. У статті розроблено напівмарківську модель функціонування зразка озброєння та військової техніки з урахуванням передвідмовного стану, контролю технічного стану, планового відновлення та аварійного ремонту. Отримано аналітичну залежність середніх питомих витрат від періодичності відновлення та встановлено її оптимальне значення. Проведено аналіз впливу параметрів деградації технічного стану на оптимальні режими відновлення.

Елементи наукової новизни. Наукова новизна зводиться до розроблення методичного підходу стосовно визначення періодичності відновлення на основі напівмарківського моделювання з урахуванням передвідмовного стану та ймовірності його виявлення.

Теоретичне й практичне значення викладеного у статті. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розвитку методичних основ визначення раціональних режимів відновлення складних технічних систем військового призначення. Практичне значення зводиться до можливості використання запропонованого підходу під час обтрунтування періодичності відновлення зразків військової техніки, планування технічного обслуговування та ремонту, підвищення ефективності технічного забезпечення військ, зменшення експлуатаційних витрат і підвищення готовності техніки до застосування за призначенням.

Ключові слова: бойові броньовані машини, відновлення, військова техніка, експлуатація, надійність, ремонт, технічний стан, техніко-економічна оцінка.

Вступ

Сучасні умови ведення бойових дій характеризуються значним зростанням інтенсивності використання зразків озброєння та військової техніки (далі – ОВТ), підвищеним рівнем їх пошкодження, різноманітністю номенклатури та складністю

організації технічного забезпечення військ. Особливої актуальності набуває проблема забезпечення необхідного рівня технічної готовності зразків ОВТ Сухопутних військ Збройних Сил України (далі – ОВТ СВ ЗС України) в умовах їх тривалого та інтенсивного

бойового застосування. В таких умовах ефективність виконання завдань за призначенням безпосередньо залежить не лише від бойових характеристик зразків ОВТ СВ ЗСУ, але й від організації її технічної експлуатації, технічного обслуговування та відновлення [1; 2].

Традиційна планово-попереджувальна система технічного обслуговування і ремонту, що базується на жорстко регламентованих періодичностях проведення профілактичних заходів, не повною мірою враховує реальні умови експлуатації зразків ОВТ СВ ЗСУ у воєнний час [3; 4]. Унаслідок цього виникають або надлишкові витрати ресурсів через передчасне проведення відновлювальних робіт, або підвищується ризик відмов у разі надмірного збільшення інтервалів між технічними впливами. За таких умов, одним із пріоритетних напрямів розвитку системи технічного забезпечення військ є перехід до експлуатації ОВТ СВ ЗС України за технічним станом, що передбачає виконання відновлювальних заходів на основі результатів контролю технічного стану.

Постановка проблеми. Експлуатація за технічним станом дає змогу забезпечити раціональне використання ресурсу зразків ОВТ, зменшити тривалість їх простою у ремонті, підвищити коефіцієнт технічної готовності та знизити загальні витрати на експлуатацію. Разом із тим, реалізація такого підходу потребує науково обґрунтованого визначення параметрів проведення контролю технічного стану та періодичності відновлення, які забезпечують оптимальне співвідношення між витратами на технічне забезпечення та ефективністю функціонування зразків ОВТ.

Аналіз наукових досліджень у галузі надійності та експлуатації складних технічних систем свідчить, що для опису процесів їх функціонування з урахуванням випадкового характеру переходів між станами широко застосовується апарат марківських і напівмарківських випадкових процесів. Використання такого підходу дає змогу врахувати багатостановість процесу експлуатації, різні види технічних впливів, випадкову тривалість перебування об'єкта у відповідних станах, а також отримати аналітичні залежності для оцінювання показників ефективності функціонування складних технічних систем. Водночас, питання визначення оптимальної періодичності відновлення зразків військової техніки за технічним станом з урахуванням економічних показників їх експлуатації в умовах інтенсивного бойового застосування потребує подальшого дослідження та вдосконалення існуючих методичних підходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення ефективності експлуатації та відновлення ОВТ традиційно належить до пріоритетних напрямів військово-технічних досліджень. У наукових працях вітчизняних і зарубіжних дослідників сформовано теоретичні основи аналізу процесів функціонування складних технічних систем, їх технічного обслуговування та ремонту, а також оцінювання економічної ефективності експлуатації [4; 5].

Фундаментальні положення щодо системного підходу до дослідження процесів експлуатації та відновлення зразків озброєння і військової техніки викладено у наукових роботах [6–8]. У наукових дослідженнях обґрунтовано наукові основи синтезу систем технічного забезпечення експлуатації і ремонту озброєння та військової техніки, сформовано методологію дослідження організаційно-технічних систем військового призначення та визначено роль системного підходу під час розв'язання задач відновлення техніки в умовах експлуатації.

Значний внесок у розвиток теорії відновлення експлуатаційних властивостей технічних систем зроблено у наукових працях [5; 6], де сформовано математичні методи оцінювання та прогнозування технічного стану складних технічних систем, а також розроблено наукові основи переходу озброєння і військової техніки на експлуатацію за технічним станом. У зазначених роботах доведено доцільність використання імовірнісних та статистичних методів під час дослідження процесів деградації технічного стану і планування відновлювальних заходів.

Важливі положення щодо економічних аспектів експлуатації та ремонту зразків військової техніки наведені у працях [7; 9], де обґрунтовано підходи до оцінювання витрат на виробництво, експлуатацію та ремонт озброєння і техніки. Розвиток методичних підходів до техніко-економічного оцінювання експлуатації озброєння і військової техніки відображено у сучасних дослідженнях, присвячених оцінюванню ефективності ремонту та експлуатації зразків військової техніки [5].

Питання моделювання процесів функціонування складних технічних систем із використанням апарату марківських і напівмарківських випадкових процесів детально розглянуті у роботах, де сформовано теоретичні засади побудови відповідних математичних моделей і отримання стаціонарних характеристик функціонування систем [6; 8; 10]. Застосування такого підходу дозволяє враховувати багатостановість процесів експлуатації, випадковий характер переходів між станами системи та різні види технічних впливів.

У наукових працях, присвячених експлуатації військової автомобільної техніки, значну увагу приділено питанням аналізу відмов, оцінювання ремонтпридатності та ефективності відновлення техніки. У роботах [1] розроблено методичні основи дослідження ремонтпридатності військової автомобільної техніки, формалізовано задачі оцінювання ефективності ремонту та запропоновано логіко-імовірнісні методи аналізу технічного стану техніки.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із визначенням оптимальної періодичності проведення технічного обслуговування і профілактичних відновлень складних технічних систем. У роботах зарубіжних дослідників розроблено математичні моделі оптимізації періодичності технічного обслуговування за критеріями надійності та економічної ефективності [11–13]. Разом з тим

зазначені моделі здебільшого орієнтовані на цивільні технічні системи та не враховують специфіку експлуатації військової техніки в умовах інтенсивного бойового застосування.

Аналіз наукових праць свідчить, що значна увага приділяється питанням переходу до експлуатації ОВТ за технічним станом. Водночас, питання визначення оптимальної періодичності відновлення зразків ОВТ з урахуванням економічних показників їх функціонування в умовах інтенсивного бойового застосування потребує подальшого розвитку. Отже, існуючі наукові дослідження створюють необхідне теоретичне підґрунтя для розроблення методичного підходу до визначення оптимальної періодичності відновлення зразків ОВТ, що і зумовлює постановку задачі цієї статті.

Метою статті є розроблення методичного підходу до визначення оптимальної періодичності відновлення зразків озброєння та військової техніки на основі мінімізації середніх питомих витрат з урахуванням динаміки зміни технічного стану та часової надмірності в процесі експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження

У процесі експлуатації зразків ОВТ СВ ЗС України в умовах інтенсивного бойового застосування характерною особливістю є значна варіативність режимів роботи, підвищені навантаження на основні вузли та агрегати, а також нерівномірність процесів деградації технічного стану. За таких умов застосування жорстко регламентованих періодичностей технічного обслуговування не забезпечує раціонального використання ресурсу техніки та призводить до зростання витрат на її експлуатацію та відновлення.

Перехід до відновлення за технічним станом передбачає проведення періодичного контролю параметрів технічного стану зразків ОВТ та прийняття рішень щодо необхідності виконання відновлювальних робіт залежно від фактичного рівня деградації їх експлуатаційних властивостей. Реалізація такого підходу потребує формалізації процесу функціонування зразків ВТ у вигляді математичної моделі, яка б враховувала випадковий характер переходів між станами працездатності, можливість проведення контролю технічного стану, планового відновлення та аварійного ремонту.

З метою розв'язання задачі доцільно використати апарат напівмарківських випадкових процесів, який дає змогу описати багатостановий процес функціонування технічного об'єкта, врахувати довільні закони розподілу часу перебування у відповідних станах та отримати аналітичні співвідношення для визначення показників ефективності його експлуатації. Побудуємо математичну модель процесу функціонування зразка ОВТ (об'єкту) з урахуванням проведення контролю технічного стану, планового відновлення та аварійного ремонту. Розглянемо об'єкт із двома рівнями працездатності: перший рівень відповідає

початковому періоду роботи об'єкта, другий – кінцевому (передвідмовному), який характеризується деяким зниженням запасу працездатності об'єкта у процесі експлуатації. Причому з другого рівня запасу працездатності об'єкт переходить у стан відмови із постійною інтенсивністю λ .

Припустимо, що у початковий період роботи об'єкт знаходиться на першому рівні працездатності та через деякий час T_k (невипадкова перемінна величина) планується проведення контролю його технічного стану з метою перевірки працездатності й виявлення потенційних несправностей. Із початкового стану об'єкт може перейти через випадковий час t_{H1} із довільною функцією розподілу $F_1(t) = P\{t_{H1} < t\}$ і кінцевим математичним очікуванням \bar{t}_{H1} у стан, який характеризується другим запасом працездатності (передвідмовний стан), чи на контроль технічного стану.

Розглянемо випадок, коли об'єкт переходить у передвідмовний стан ($t_{H1} < T_k$). У цьому стані об'єкт перебуває випадковий час t_H до відмови із функцією розподілу $F(t) = P\{t_H < t\}$ чи до початку проведення контролю технічного стану. Якщо до призначеного часу T_k об'єкт не відмовив, то в цей момент починається проведення заходів з контролю технічного стану, тривалість яких є випадковою величиною t_k , розподіленою за довільним законом із функцією розподілу $F_k(t) = P\{t_{Hk} < t\}$ і кінцевим математичним очікуванням \bar{t}_k . Якщо в процесі прогнозуючого контролю виявляються передумови і джерела потенційних відмов, то об'єкт виводиться на планове відновлення тривалістю \bar{t}_{nv} . В протилежному випадку, коли потреби у відновленні не виявлено, після закінчення контролю технічного стану об'єкт продовжує своє функціонування.

У разі, коли відмова наступить до моменту часу T_k , починається відновлення працездатності (відновлювальний ремонт) об'єкта, тривалість якого є випадковою величиною t_{ap} із довільною функцією розподілу $F_{ap}(t) = P\{t_{ap} < t\}$ і кінцевим математичним очікуванням \bar{t}_{ap} . Якщо відновлювальний ремонт об'єкта буде виконано за допустимий час t_∂ (невипадкова перемінна величина), тобто $t_{ap} \leq t_\partial$, то відмови (зриву функціонування) об'єкта не відбудеться і величина t_{ap} відноситься до корисного часу функціонування об'єкта. В протилежному випадку ($t_{ap} > t_\partial$) виникне відмова об'єкта і відрізок часу ($t_{ap} - t_\partial$) буде відноситись до простоїв.

Розглянемо випадок, коли об'єкт перебуває на першому рівні працездатності й настав час контролю ($t_{H1} > T_k$), тривалість якого t_k обмежена деяким допустимим (резервним) часом $t_{\partial 1}$. Якщо $t_k \leq t_{\partial 1}$, то об'єкт продовжує нормально функціонувати, при цьому тривалість t_k відноситься до корисного часу. У протилежному випадку (за $t_k > t_{\partial 1}$) відрізок часу ($t_k - t_{\partial 1}$) відноситься до простоїв об'єкта.

Будемо вважати, що під час проведення планового відновлення працездатності об'єкта середні витрати за

одиночку часу складають $c_{пв}$, під час проведення контролю технічного стану – $c_{к}$, а під час аварійного відновлення працездатності – $c_{ар}$ (аварійний ремонт). Для формального представлення середніх питомих витрат введемо наступні припущення:

після проведення будь-якого виду відновлювальних робіт об'єкт повністю відновлює свої початкові властивості, момент проведення чергового контролю технічного стану перепланується і весь процес функціонування об'єкта повторюється;

відмова одного елементу об'єкта тягне за собою відмову інших його елементів, що збільшує загальну трудомісткість аварійного ремонту. Тому середня тривалість аварійного ремонту об'єкта більша середньої тривалості планового відновлення та контролю $\bar{t}_{ар} > \bar{t}_{пв} > \bar{t}_{к}$;

витрати на аварійний ремонт більші за витрати на планове відновлення працездатності об'єкта та контроль технічного стану $c_{ар} > c_{пв} > c_{к}$.

Вимагається отримати розрахункові співвідношення для середніх питомих витрат $\bar{C}(T_{к})$, що припадають на одиницю часу перебування об'єкту розгляду у підмножині працездатних станів. Представимо процес функціонування об'єкту розгляду

напівмарківським випадковим процесом $x(t)$ (далі – НМП) [13], граф станів і переходів якого наведено на рис. 1, де:

e_0 – стан, в якому об'єкт працездатний і має початкові властивості;

e_1 – стан, в якому об'єкт працездатний, але має знижений запас працездатності;

e_2 – стан, в якому об'єкту проводиться аварійний ремонт внаслідок відмови за допустимий час t_{δ} ;

e_3, e_4 – стани, в яких проводиться контроль технічного стану об'єкта відповідно на другому і першому рівнях запасу працездатності (витрата часу $t_{\delta 1}$);

e_5, e_7 – стани, в яких об'єкт простоє під час проведення контролю технічного стану (після витрати резерву часу $t_{\delta 1}$);

e_6 – стан, в якому об'єкт простоє по причині проведення планового ремонту за станом;

e_8 – стан, в якому об'єкту проводиться аварійний ремонт внаслідок відмови після витрати резерву часу t_{δ} ;

E_+, E_- – області працездатних і непрацездатних станів об'єкта відповідно.

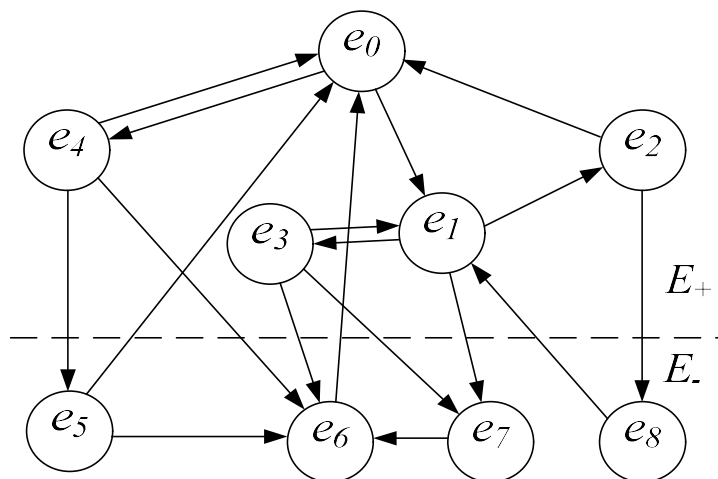


Рисунок 1 – Граф станів і переходів випадкового процесу $x(t)$

Позначимо через A, B, D підмножини станів, в яких проводиться відповідно аварійний (відновлювальний) ремонт, планове відновлення працездатності об'єкта та контроль технічного стану. Тоді середні питомі

витрати \bar{C} , що припадають на одиницю часу перебування об'єкта у працездатному стані, можуть бути визначені за виразом:

$$\bar{C} = [c_{ар} \sum_{n \in A} \pi_n a_n + c_{пв} \sum_{j \in B} \pi_j a_j + c_{к} \sum_{k \in D} \pi_k a_k] (\sum_{i \in E_+} \pi_i a_i)^{-1}; \quad (1)$$

де $c_{ар}, c_{пв}, c_{к}$ – витрати, пов'язані з аварійним ремонтом, плановим відновленням працездатності та контролем технічного стану об'єкта відповідно.

В умовах інтенсивного бойового застосування зразків ОБТ одним із ключових показників ефективності їх експлуатації є витрати, пов'язані з підтриманням працездатності упродовж заданого інтервалу часу. З огляду на обмеженість матеріально-технічних ресурсів та необхідність забезпечення

високого рівня технічної готовності військових підрозділів, важливим є визначення такого режиму проведення контролю технічного стану та відновлення, який забезпечує мінімізацію витрат за збереження необхідного рівня працездатності техніки.

Для кількісного оцінювання ефективності функціонування об'єкта доцільно використовувати показник середніх питомих витрат, що припадають на одиницю часу перебування зразка ОБТ у

працездатному стані. Використання цього показника дає змогу комплексно врахувати витрати на проведення контролю технічного стану, планове відновлення працездатності та аварійний ремонт, а також співвіднести їх із тривалістю ефективного функціонування об'єкта. Отже, задача визначення оптимальної періодичності контролю технічного стану зводиться до мінімізації середніх питомих витрат на експлуатацію зразка військової техніки. Середні

питомі витрати $\bar{C}(T_k)$, для нашого випадку, з урахуванням виразу (1) та графа станів і переходів (рис. 1) будуть визначатись, як відношення середніх витрат на перебування процесу $x(t)$ у підмножині станів, в яких проводиться, відповідно, аварійний ремонт, планове відновлення працездатності об'єкта та контроль технічного стану, до стаціонарної ймовірності перебування процесу у працездатному стані [6–9]:

$$\bar{C}(T_k) = [c_{ap}(\pi_2 a_2 + \pi_8 a_8) + c_{пв} \pi_6 a_6 + c_K(\pi_3 a_3 + \pi_4 a_4 + \pi_7 a_7)] (\sum_{i=0}^4 \pi_i a_i)^{-1}; \quad (2)$$

де π_i – стаціонарні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова;

a_i – середній час перебування НМП у стані e_i :

$$a_i = \int_0^\infty x dF_i(x); \quad (3)$$

Стаціонарні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова визначають із системи рівнянь

$$\pi_i = \sum_{j \in E} P_{ji} \pi_j; \quad (4)$$

де P_{ji} – стаціонарна ймовірність переходу НМП із переднього стану e_j в інший стан e_i .

З урахуванням умови нормування $\sum_{i \in E} \pi_i = 1$ та у відповідності з графом станів і переходів (рис. 1) вираз (4) може бути записаний так:

$$\left. \begin{aligned} \pi_0 &= \pi_2 P_{20} + \pi_4 P_{40} + \pi_5 P_{50} + \pi_6 P_{60}; \\ \pi_1 &= \pi_0 P_{01} + P_3 P_{31} + P_7 P_{71} + \pi_8 P_{81}; \\ \pi_2 &= \pi_1 P_{12}; \\ \pi_3 &= \pi_1 P_{13}; \\ \pi_4 &= \pi_0 P_{04}; \\ \pi_5 &= \pi_4 P_{45}; \\ \pi_6 &= \pi_3 P_{36} + \pi_4 P_{46} + \pi_5 P_{56} + \pi_7 P_{76}; \\ \pi_7 &= \pi_3 P_{37}; \\ \pi_8 &= \pi_2 P_{28} \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

з урахуванням умов нормування $\sum_{i \in E} \pi_i = 1$.

Розв'язуючи систему рівнянь (5) і підставляючи знайдені значення π_i у формулу (2), отримаємо:

$$\bar{C}(T_k) = \frac{K[c_{ap} P_{12}(a_2 + P_{28} a_8) + c_{пв} P_{13} a_6 (P_{36} + P_{37} P_{76}) + c_K [K P_{13}(a_3 + P_{37} a_7) + P_{04}(a_4 + P_{45} a_5)]}{a_0 + K(a_1 + P_{12} a_2 + P_{13} a_3) + P_{04} a_4} \quad (6)$$

де $K = p_{01} [1 - p_{13}(p_{31} + p_{37} p_{71}) - p_{12} p_{28} p_{81}]^{-1}$.

У роботі [1] отримані вирази для a_i та p_{ij} , що відповідають сформульованим вище умовам задачі. Після підстановки цих виразів у формулу (6) та ряду перетворень остаточно отримаємо розрахункове співвідношення для середніх питомих витрат:

$$\bar{C}(T_k) = \frac{K(c_{ap} F t_{ap} + c_{пв} \bar{F} \eta_2 t_{пв}) + c_K t_K (K \bar{F} + \bar{F}_1)}{M_{н1} + K[M_{н1} + F(T_k) M_{ap} + \bar{F}(T_k) M_K] + \bar{F}_1(T_k) M_K}$$

де $K = F_1(T_k) \times$

$$\times \{1 - \bar{F}(T_k) [1 - F(T_k) [1 - F_b(t_d)] - \eta_2]\}^{-1};$$

$$M_{н1} = \int_0^{T_k} \bar{F}_1(t) dt; \quad M_{н1} = \int_0^{T_k} \bar{F}(t) dt;$$

$$M_{ap} = \int_0^{t_d} \bar{F}_{ap}(t) dt; \quad M_K = \int_0^{t_{д1}} \bar{F}_K(t) dt;$$

$$F_1(T_k) = P\{t_{н1} < T_k\};$$

$$\bar{F}_1(T_k) = 1 - F_1(T_k);$$

$$F(T_k) = P\{t_{н} < T_k\};$$

$$\bar{F}(T_k) = 1 - F(T_k).$$

У виразі (7) позначено:

а) для випадку розподілу випадкових величин $t_{н}$, t_k та t_{ap} за експоненційним законом:

$$M_{н1} = M \min(t_{н}, T_k) = \int_0^{T_k} \exp(-\lambda T_k) dt = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_k)];$$

$$M_{н1} = M \min(t_{н1}, T_k) = \int_0^{T_k} \exp(-n \lambda t) dt = \frac{1}{n \lambda} [1 - \exp(-n \lambda T_k)],$$

де $n > 0$, величина, яку прийнято називати коефіцієнтом старіння [3];

$$F_1(T_k) = 1 - \exp(-n \lambda T_k);$$

$$F(T_k) = 1 - \exp(-\lambda T_k);$$

$$F_K(t_{д1}) = 1 - \exp(-\gamma_K t_{д1});$$

$$M_{ap} = M \min(t_{ap}, t_{д}) = \int_0^{t_{д}} \exp(-\mu t) dt = \frac{1}{\mu} [1 - \exp(-\mu t_{д})];$$

$$M_K = M \min(t_K, t_{д1}) = \int_0^{t_{д1}} \exp(-\gamma_K t) dt = \frac{1}{\gamma_K} [1 - \exp(-\gamma_K t_{д1})];$$

$$\bar{t}_{ap} = \frac{1}{\mu}; \quad \bar{t}_{пв} = \frac{1}{\mu_1}; \quad \bar{t}_K = \frac{1}{\gamma_K}.$$

б) для випадку розподілу випадкових величин $t_{н}$ та t_{ap} за законом Ерланга 2-го порядку, а $t_{н1}$ та t_k – за експоненційним законом:

$$F(T_k) = 1 - \exp(-\lambda T_k) (1 + \lambda T_k);$$

$$M_{н1} = M \min(t_{н}, T_k) = \frac{2}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda T_k)] - T_k \exp(-\lambda T_k);$$

$$M_{ap} = M \min(t_{ap}, t_{д}) = \frac{2}{\mu} [1 - \exp(-\mu t_{д})] - t_{д} \exp(-\mu t_{д});$$

$$\bar{t}_{пв} = \frac{2}{\mu}; \quad \bar{t}_K = \frac{2}{\gamma_K}.$$

Якщо взяти похідну від отриманого виразу (7) по T_k і прирівняти її до нуля, то можна отримати рівняння для визначення оптимальних значень періодичності проведення контролю технічного стану T_k^* . Проте це рівняння відрізняється надмірною громіздкістю і тут не приводиться. Для знаходження оптимального значення періодичності T_k^* доцільно будувати графік

середніх питомих витрат як функції періодичності і визначати значення T_k^* та відповідне йому мінімальне значення $\bar{C}(T_k)$ безпосередньо за графіком.

На рис. 2-4 наведені деякі результати розрахунків із використанням виразу (7), які дають змогу кількісно оцінити вплив різних параметрів на показник вартості $\bar{C}(T_k)$. Розрахунки проводилися за такими вхідними даними:

$\bar{t}_H = 200$ год.; $n = 0,4$; $\eta_1 = 0,2$; $\eta_2 = 0,3$;
 $\bar{t}_{ap} = 12$ год.; $\eta_2 = 0,3$; $\bar{t}_{ap} = 12$ год.;
 $\bar{t}_{пв} = 6$ год.; $\bar{t}_k = 0,5$ год.; $t_\theta = 3$ год.; $t_{\theta 1} = 1$ год.;
 $\bar{t}_k = 0,5$ год.; $t_\theta = 3$ год.; $t_{\theta 1} = 1$ год.

На рисунках 2, 3 суцільні лінії відповідають випадку розподілу випадкових величин за законом Ерланга 2-го порядку, а пунктирні – випадку розподілу усіх випадкових величин за експоненційним законом

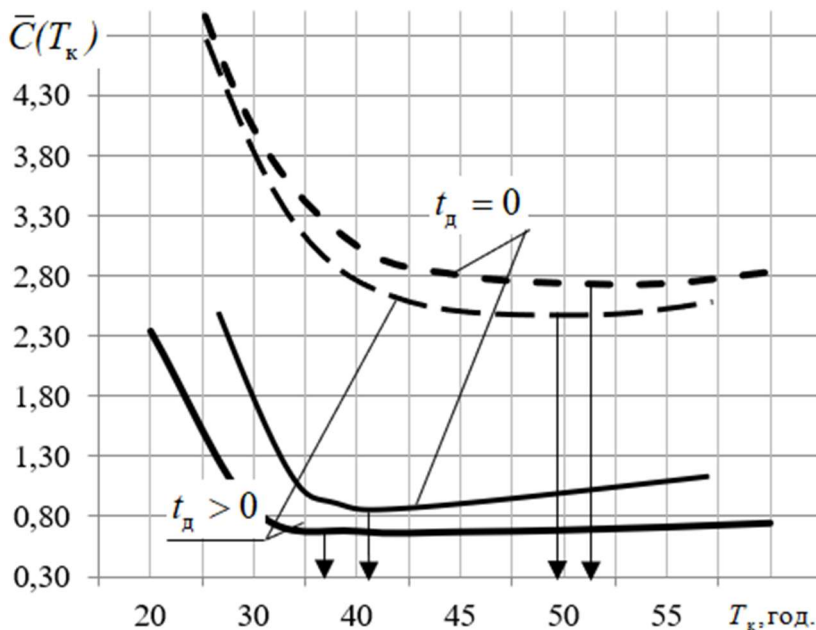


Рисунок 2 – Характер залежності середніх питомих витрат від періодичності контролю за різних законів розподілу тривалості проведення контролю, планового ремонту та аварійного ремонту

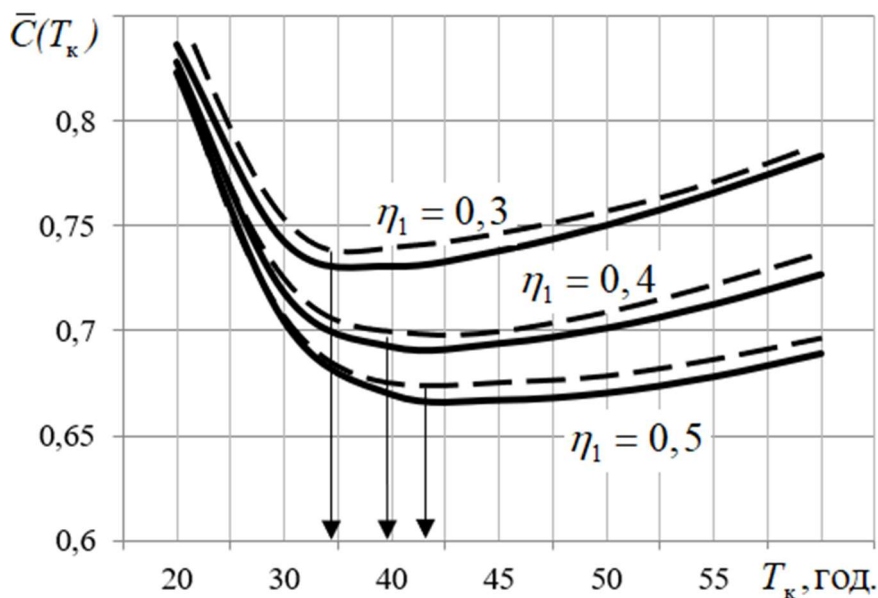
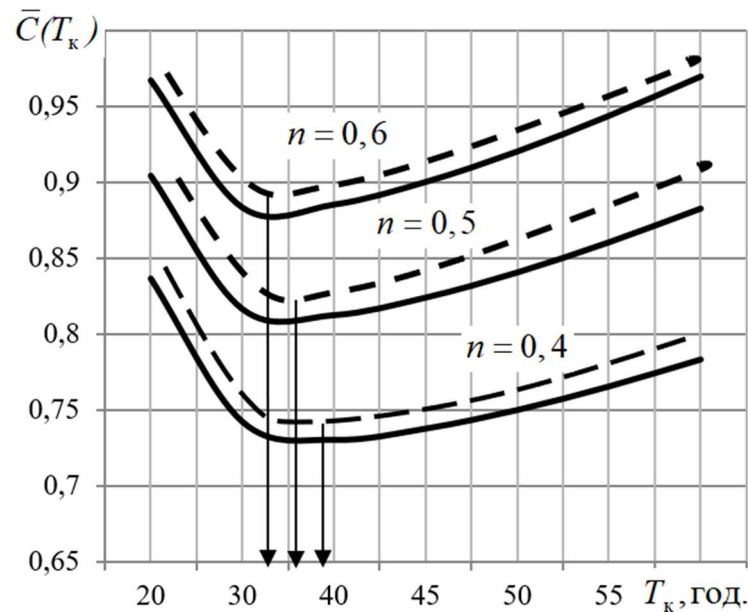


Рисунок 3 – Характер залежності $\bar{C}(T_k)$ від T_k за різних значень ймовірності виявлення потенційних несправностей η_2 ($\eta_1 = 0,2$) на другому рівні запасу працездатності

Рисунок 4 – Характер залежності $\bar{C}(T_k)$ від T_k за різних значень коефіцієнта старіння n

Отримане аналітичне співвідношення для середніх питомих витрат дає змогу виконувати параметричний аналіз впливу характеристик процесу деградації технічного стану, параметрів контролю та відновлення на ефективність експлуатації зразків ОВТ. Практичне використання цього співвідношення зводиться до визначення такої періодичності проведення контролю технічного стану, за якої досягається мінімальне значення середніх питомих витрат.

Побудова залежності середніх питомих витрат від періодичності контролю дає змогу визначити область раціональних значень періодичності проведення контрольних заходів, що забезпечують оптимальне співвідношення між витратами на технічне забезпечення та тривалістю корисного функціонування техніки. З огляду на це, особливий інтерес становить дослідження впливу ймовірності виявлення потенційних несправностей, параметрів деградації технічного стану та використання резерву часу на положення мінімуму функції витрат. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування параметрів організації технічного обслуговування і ремонту зразків ОВТ в системі технічного забезпечення військ.

Висновки

У статті розв'язане науково-прикладне завдання визначення раціональної періодичності відновлення зразків військової техніки на основі мінімізації середніх питомих витрат їх функціонування. Побудовано напівмарківську модель зміни технічного стану, що враховує деградацію, контроль

Список бібліографічних посилань

1. Шишанов М.О. Методичні основи дослідження ремонтпридатності військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 3(23). С. 53–57. URL: <https://journal.cndiovt.com.ua/index.php/ovt/article/view/470?articlesBySimilarityPage=3> (дата звернення: 24.02.2026).
2. Dachkovsky V., Kondratiuk I., Diadechko A., Sampir O.,

працездатності, планове відновлення та аварійний ремонт. Отримано аналітичні залежності для визначення середніх питомих витрат та встановлено існування оптимальної періодичності відновлення. Поставлена мета дослідження досягнута.

Теоретичною значущістю викладеного у статті є розвиток методичних основ техніко-економічного обґрунтування параметрів відновлення складних технічних систем військового призначення. Практична цінність зводиться до можливості використання запропонованого підходу для визначення раціональних режимів відновлення військової техніки, підвищення ефективності технічного забезпечення військ та зменшення експлуатаційних витрат.

Перспективи і напрями подальших досліджень. Перспективи подальших досліджень пов'язані з урахуванням багатоступеневої деградації технічного стану, впливу умов бойового застосування, а також інтеграцією запропонованого підходу з системами експлуатації за технічним станом і використанням даних моніторингу технічного стану для адаптивного визначення періодичності відновлення.

Конфлікт інтересів – відсутній.

Фінансування – фінансування дослідження не здійснювалося.

Доступність даних – дослідження виконано з використанням виключно відкритих даних, доступних у публічних джерелах.

Використання засобів штучного інтелекту – не використовувались.

- Pavlov D. Cross-temporal Analysis of the Russian Federation Weapons and Military Equipment Losses During the Wars on the Territory of Other States Over the Last 30 Years. *Social Development and Security*. 2022. Vol. 12. № 3. P. 14–29. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.3.3>.
3. Dachkovsky V., Sampir O., Horbachova Y. Methodical approach to evaluation

of economic efficiency of repairing the weapons and military equipment. *VUZF*. 2021. № 5(1). P. 22-30. URL: https://www.researchgate.net/publication/340864070_Methodical_approach_to_evaluation_of_economic_efficiency_of_repairing_the_weapons_and_military_equipment (accessed: 24 February 2026). 4. **Чобиток В. А.** Оценка боевой эффективности и технического совершенства вооружения и военной техники: учеб. пособие. Киев: Киевское высшее танковое училище им. И. И. Якубовского, 1984. 58 с. 5. **Чепков И.Б.** Основы военно-технических исследований. Теория и приложения. Т. 12. Научные основы системного подхода при решении задач восстановления вооружения и военной техники. Киев : Издат. дом Дмитрия Бурого, 2022. 303 с. 6. **Ковтуненко А.П., Зубарев В.В., Шишанов М.А.** Основы теории восстановления эксплуатационных свойств технических систем: монография. Київ : НАУ, 2007. 294 с. 7. **Марютін М.І., Барков Ю.С., Долгополов Б.П.** Экономика производства, эксплуатации и ремонта вооружения и техники. Москва: ВАБТВ, 1989. 188 с. 8. **Ковтуненко А.П., Шишанов М.А.,**

Зубарев А.В., Онистрат А.А. Основы военно-технических исследований. Теория и приложения: монография в 3 т. Киев. 2012. Т. 3: Синтез систем технического обеспечения эксплуатации и ремонта вооружения и военной техники. 424 с. 9. **Переверзев Л.Н., Есин Б.И.** Требования к ремонтпригодности колесных гусеничных машин, обусловленные особенностями ремонта в полевых условиях. *Надежность и контроль качества*. 1979. № 4. С. 51–55. 10. **Королюк В.С., Свищук А.В.** Полумарковские случайные эволюции. Киев: Наукова думка, 1992. 254 с. 11. **Satuneanu V.M., Moldovan C., Popentiu Fl. & Gheorghiu M.** Optimum system availability and spare allocation, Microelectron and Reliability. Pergamon Press, Oxford. 1988. № 3. P. 353–357. 12. **Dachkovskiy V., Kondratiuk I.** Technical and economic assessment of the exploitation of weapons and military equipment. *Political Science and Security Studies Journal*. 2021. Vol. 2. № 4. P. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5810146>. 13. **Рябинин И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербурга. ун-та, 2007. 278 с.

METHODOLOGICAL APPROACH TO OPTIMISING THE RENOVATION PERIODICITY OF MILITARY EQUIPMENT SAMPLES BASED ON TECHNO-ECONOMIC INDICATORS

KONDRATIUK Ihor, Doctor of Philosophy, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9408-1435>

VERETNOV Andrei, Candidate of Technical Sciences, Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-0160-7325>

ILIN Dmytro, Doctor of Philosophy, National University of Defence of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-5967-0151>

CHURILOV Ihor, Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0003-9627-3221>

The article considers a scientific and applied problem: improving the operational efficiency of military equipment by optimising the periodicity of its restoration based on technical condition under conditions of intensive combat use. The necessity of transition from the scheduled preventive maintenance and repair system to condition-based operation is substantiated. The purpose of the article is to develop a methodological approach to determining the rational periodicity of restoration of military equipment based on the minimisation of average specific costs, taking into account technical condition degradation, operability control, and restoration measures.

Research methods. *The study applies methods of system analysis, stochastic process theory, semi-Markov modelling, and technical-economic analysis, which enable it to formalise the functioning of military equipment and to determine the dependence of costs on restoration periodicity.*

Literature review. *Existing research establishes theoretical foundations for analysing the functioning of complex technical systems, their maintenance and repair, and their economic efficiency evaluation. Scholars have developed probabilistic and statistical methods for assessing technical condition degradation, Markov-based modelling approaches, and methodological frameworks for maintainability analysis of military automotive equipment. However, while civilian-oriented optimisation models are well developed, determining optimal restoration intervals for weapons and military equipment under intensive combat conditions remains under-addressed and warrants further investigation.*

Research results. *A semi-Markov model of the functioning of military equipment was developed, considering the pre-failure state, condition monitoring, scheduled restoration, and corrective repair. An analytical dependence of average specific costs on restoration periodicity was obtained, and its optimal value was determined. The influence of technical condition degradation parameters on optimal restoration modes was analysed.*

Scientific novelty. *The scientific novelty lies in the development of a methodological approach to determining restoration periodicity based on semi-Markov modelling, accounting for the pre-failure state and the probability of its detection.*

Theoretical and practical significance of the article. *The theoretical significance of the results lies in the development of methodological foundations for determining rational restoration regimes for complex military-technical systems. The practical significance lies in the possibility of using the proposed approach to substantiate the restoration periodicity of military equipment, plan maintenance and repair, improve the efficiency of technical support for troops, reduce operational costs, and increase equipment readiness for intended use.*

Keywords: armoured combat vehicles, refurbishment, military equipment, operation, reliability, repair, technical condition, cost-benefit analysis.

References

1. **Shyshanov, M.O.**, (2019) Methodological foundations of research on maintainability of military automotive equipment [online]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, 3(23), 53–57. Available at: <https://journal.cndiovt.com.ua/index.php/ovt/article/view/470?articlesBySimilarityPage=3> [Accessed: 24 February 2026].
2. **Dachkovsky, V., Kondratiuk, I., Diadechko, A., Sampir, O. and Pavlov, D.**, (2022) Cross-temporal analysis of the Russian Federation weapons and military equipment losses during the wars on the territory of other states over the last 30 years. *Social Development and Security*, 12(3), 14–29. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.3.3>.
3. **Dachkovsky, V., Sampir, O. and Horbachova, Y.**, (2021). Methodical approach to evaluation of economic efficiency of repairing the weapons and military equipment [online]. *VUZF*, 5(1), 22-30. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/340864070> Methodical approach to evaluation of economic efficiency of repairing the weapons and military equipment [Accessed: 24 February 2026].
4. **Chobitok, V.A.**, (1984). Assessment of combat effectiveness and technical perfection of weapons and military equipment: textbook. Kyiv: Kyiv Higher Tank School named after I. I. Yakubovsky.
5. **Chepkov, I.B.** (ed.) (2022) Fundamentals of military-technical research. Theory and applications. 12: Scientific foundations of the systems approach in solving problems of weapons and military equipment restoration. Kyiv, 303.
6. **Kovtunenکو, A.P.**, (2007). Fundamentals of the theory of restoration of operational properties of technical systems: monograph. Kyiv: NAU, 296.
7. **Mariutin, M.I., Barkov, Yu.S. and Dolhopolov, B.P.**, (1989) Economics of production, operation and repair of weapons and equipment. Moscow: VABTV, 188.
8. **Kovtunenکو, A.P., Shyshanov, M.A., Zubarev, A.V. and Onystrat, A.A.**, (2012). Fundamentals of military-technical research. Theory and applications (monograph): in 3 vols. Vol. 3: Synthesis of technical support systems for operation and repair of weapons and military equipment. Kyiv, 424.
9. **Pereverzev, L.N. and Yesin, B.I.**, (1979). Requirements for maintainability of wheeled and tracked vehicles determined by the specifics of repair in field conditions. *Nadezhnost i kontrol kachestva*, 4, 51–55.
10. **Koroliuk, V.S.**, (1992). Semi-Markov random evolutions. Kyiv: Naukova Dumka, 256.
11. **Catuneanu, V.M., Moldovan, C., Popentiu, Fl. and Gheorghiu, M.** (1988) *Optimum system availability and spare allocation*. Microelectronics and Reliability. Oxford: Pergamon Press, 3, pp. 353–357.
12. **Dachkovskiy, V.O.**, (2021) Technical and economic assessment of the weapons and military equipment exploitation. *Political Science and Security Studies Journal*. 2(4), 39-47. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5810146>.
13. **Riabinin, I. A.**, (2007). Reliability and safety of structurally complex systems. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 276.

Рукопис надійшов до редакції 01.04.2026
 Рукопис прийнято до друку після рецензування 10.04.2026
 Дата публікації 30.04.2026