

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-79-87>

УДК 629.4.08:62-192

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАНОВО-ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З УРАХУВАННЯМ РИЗИКУ ВІДМОВ

Доля К.В.

OPTIMIZATION OF PLANNED AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF ROLLING STOCK TAKING INTO ACCOUNT THE RISK OF FAILURES

Dolia K.V.

У роботі розглянуто задачу підвищення ефективності планово-попереджувального технічного обслуговування (ППТО) рухомого складу шляхом переходу від жорстко фіксованих регламентних інтервалів до ризик-орієнтованого планування (Risk-Based Maintenance, RBM). Актуальність теми зумовлена одночасним зростанням вимог до безпеки та пунктуальності перевезень, старінням парку й підвищенням вартості простоїв, тоді як пропускна спроможність депо (пости, персонал, запасні частини) залишається обмеженою. У таких умовах однакові інтервали ТО для всіх одиниць техніки компромісом: для частини рухомого складу вони надмірно консервативні та спричиняють зайві витрати, для іншої частини — створюють підвищену ймовірність відмов у русі. Ключова ідея RBM полягає в узгодженні періодичності та пріоритетів ППТО з ймовірністю відмови та наслідками відмови. Наслідки в залізничних системах мають багатокомпонентний характер і включають безпекові ефекти, експлуатаційні втрати (затримки, зрив графіка, зниження доступності парку) та економічні витрати (ремонт, простої, штрафи). Мета дослідження — запропонувати та обґрунтувати підхід до вибору міжремонтних інтервалів, який мінімізує очікувані сумарні втрати за забезпечення прийнятного рівня ризику. Методична основа роботи поєднує огляд сучасних концепцій ППТО, RCM, CBM і PdM/PHM із формалізацією задачі типу “витрати + ризик” на базі параметричних моделей надійності. Для кількісного опису деградації застосовано модель часу до відмови з розподілом Вейбулла, що дає змогу пов’язати інтервал ППТО T з ймовірністю відмови $F(T)$ та очікуваними витратами на планове й коригувальне втручання. На демонстраційному прикладі виконано розрахунок раціонального

інтервалу ППТО та проведено аналіз чутливості до співвідношення вартостей планових і аварійних робіт. Показано наявність області оптимальних (раціональних) інтервалів, у якій досягається компроміс між частотою планових робіт і втратами від відмов. Отримані результати можуть бути використані як підґрунтя для подальшої інтеграції з даними моніторингу стану (CBM/PdM) та для розширення постановки шляхом введення явних обмежень на ризик і ресурсних обмежень депо.

Ключові слова: рухомий склад, технічне обслуговування, планово-попереджувальне ТО, ризик відмов, надійність, розподіл Вейбулла, RCM, CBM, PdM.

Вступ. Надійність та доступність рухомого складу безпосередньо визначають стійкість перевізного процесу: виконання графіка руху, оборот поїздів, використання пропускної спроможності дільниць і якість сервісу для вантажних та пасажирських перевезень. У сучасних умовах вимоги до безпеки та пунктуальності зростають, тоді як експлуатація часто відбувається за обмежених ресурсів ремонтної бази та за наявності факторів, що ускладнюють підтримання технічної готовності: старіння парку, нерівномірність навантаження, дефіцит персоналу, подорожчання запасних частин і збільшення вартості простоїв.

Традиційна практика планово-попереджувального технічного обслуговування (ППТО) ґрунтується на регламентних інтервалах (за часом або пробігом), які задаються нормативами та історично

сформованими підходами. Перевагою таких регламентів є простота та керованість: депо може планувати завантаження постів і персоналу, а експлуатаційні служби — будувати оборот. Проте фіксований інтервал за своєю природою є компромісом і не враховує реальну варіативність деградації. Для одних одиниць рухомого складу регламент може виявитися надто консервативним (виконуються “зайві” втручання, зростають простой та витрати), для інших — надто ризикованим (накопичення дефектів призводить до відмов у русі, вторинних пошкоджень та зриву графіка).

Актуальність оптимізації ППТО посилюється стохастичною природою відмов і залежністю інтенсивності відмов від умов експлуатації. Навіть для однакових типів рухомого складу відмінності у профілі навантаження, температурних режимах, якості колії, стилі ведення та організації обороту можуть суттєво змінювати темп зносу. Тому для підвищення ефективності ТО необхідно поєднувати моделі надійності, що описують імовірність відмов у часі, економічні оцінки, які відображають різницю між плановим і аварійним втручанням, та (iii) обмеження ресурсів (ремонтні потужності, матеріально-технічне забезпечення, часові “вікна” для постановки у депо).

Перспективним напрямом є ризик-орієнтоване планування технічного обслуговування (Risk-Based Maintenance, RBM), у якому рішення про інтервал і пріоритет виконання ППТО приймається з урахуванням не лише ймовірності відмови, а й наслідків відмови. У залізничному транспорті наслідки можуть бути багатокомпонентними: безпекові (підвищення ризику небезпечних ситуацій), операційні (затримки, порушення розкладу, зменшення доступності парку), економічні (вартість відновлення, штрафи, втрата доходу через простій) та репутаційні. Таким чином, навіть за однакової ймовірності відмови різні вузли/підсистеми мають різну критичність, а отже потребують різної політики ТО.

Важливим чинником актуальності RBM є цифровізація та розвиток технологій моніторингу стану (Condition Based Maintenance, CBM) і прогнозного обслуговування (Predictive Maintenance / Prognostics and Health Management, PdM/PHM). Сучасні системи діагностики, wayside-сенсори та бортові вимірювання створюють потік даних щодо стану колісних

пар, підшипників, гальмівних систем, тягового обладнання тощо [1, 2, 3]. Однак практична цінність даних виникає лише тоді, коли вони перетворюються у керовані рішення: коли саме виконувати ППТО, які роботи виконувати першочергово та як узгоджувати це з графіком експлуатації і потужностями депо. Саме тому актуальним є розвиток інтегрованих підходів, які поєднують моделі надійності/ризиків з оптимізацією планів ТО та ресурсів.

Отже, актуальність теми зумовлена необхідністю зменшення позапланових відмов і втрат від простой без непропорційного збільшення частоти планових втручань. Розроблення та обґрунтування ризик-орієнтованого підходу до ППТО створює основу для прозорого, відтворюваного планування інтервалів ТО, підвищення технічної готовності та раціонального використання ресурсів депо.

Метою роботи є сформулювати рекомендації щодо практичного застосування підходу на рівні депо (пріоритезація робіт, використання даних моніторингу, узгодження з ресурсними обмеженнями).

Об’єкт дослідження — процеси планування та виконання планово-попереджувального технічного обслуговування рухомого складу в умовах стохастичного виникнення відмов і обмежених ресурсів ремонтної бази.

Предмет дослідження — методи та моделі ризик-орієнтованого вибору між ремонтних інтервалів ППТО (та, за потреби, пріоритетів виконання) на основі параметричних моделей надійності й оцінювання наслідків відмов.

Мета дослідження — розробити та обґрунтувати підхід до оптимізації інтервалів ППТО рухомого складу з урахуванням ризику відмов, який мінімізує очікувані сумарні втрати (витрати на ТО/ремонт і простій) за забезпечення прийняттого рівня безпеки та експлуатаційної надійності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі задачі дослідження:

- виконати огляд сучасних підходів до ТО рухомого складу (ППТО, RCM, CBM, PdM/PHM, RBM)
- та визначити їх придатність для задачі оптимізації інтервалів;
- сформувати систему показників ефективності (KPI) для оцінювання якості політики ТО: частота відмов, доступність, простій, питомі витрати, операційні втрати від затримок;

- обрати модель надійності для опису часу до відмови ключового вузла/підсистеми (наприклад, Вейбулівський розподіл) та визначити підхід до оцінювання параметрів за даними;

- запропонувати ризик-орієнтовану постановку оптимізації інтервалу ППТО (функція “вартість + ризик” або мінімізація очікуваних втрат за обмеженням на ризик);

- визначити вимоги до вихідних даних і процедуру верифікації/валідації моделі на основі фактичних показників експлуатації;

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний науковий доробок у сфері технічного обслуговування залізничного транспорту умовно можна згрупувати за чотирма напрямками: моніторинг технічного стану та діагностика, прогнозування деградації й залишкового ресурсу (RUL) у межах PdM/PdM, оптимізація графіків ППТО та інтеграція з експлуатаційним плануванням, (4) ризик-орієнтовані фреймворки прийняття рішень.

Поширення wayside-ionboard-систем моніторингу стимулювало значну кількість оглядових робіт. Зокрема, Kundu та ін. систематизують технології моніторингу для рухомого складу (вібрація, акустика, термографія, аналіз мастила) і обговорюють їх придатність для різних компонентів [1]. Систематичний огляд і бібліометричний аналіз Kostrzewski & Melnik демонструє зростання уваги до condition monitoring в залізничних системах, а також виділяє ключові технологічні тренди та прогалини у стандартизації даних [2]. Приклад прикладного напрямку — робастні сенсори для вузлів із мастилом (локомотиви/вагони) як інфраструктура для СВМ [3].

УРМ-спільноті підкреслюють специфіку залізничного транспорту: високі вимоги до безпеки, довгі життєві цикли активів та необхідність інтеграції технічних рішень у операційні процеси. Це відображено у спеціальному випуску ІРМ, присвяченому РМ для залізничних систем і масового транспорту [4]. На рівні флоту важливим є поєднання прогнозу відмов із рішеннями щодо планування, що демонструють моделі динамічного управління ТО для рухомого складу у *Reliability Engineering & System Safety* [5]. У цій логіці прогноз технічного стану розглядається не як самоціль, а як вхід для рішень щодо постановки у депо з урахуванням експлуатаційних обмежень.

Оптимізація графіків ППТО та інтеграція з експлуатаційним плануванням

Математичні моделі планування ТО для рухомого складу активно розвиваються у бік інтегрованих постановок “експлуатація—ТО—ресурси”. У *Journal of Rail Transport Planning & Management* розглянуто включення технічних робіт у план обігу за умов невизначеної тривалості ТО, що є типовим для реальних депо [6].

Окремий клас задач — вибір локації виконання ТО разом із календарним планом, що формалізується як Maintenance Scheduling and Location Choice Problem (MSLCP); ефективні підходи включають логіко-орієнтовану декомпозицію [7]. Стохастичні постановки, де відмови моделюються через параметричні розподіли (в т.ч. Вейбулла), представлені у сучасних роботах зі сценарним програмуванням [8].

Практично значущими є підходи до спільної оптимізації розкладів і ППТО, зокрема на основі мережевих (spatiotemporal) моделей для метрополітену [9]. Узагальнений стан алгоритмів оптимізації ППТО для залізничних транспортних засобів (включно з евристичними / метаевристичними) проаналізовано у [10], де підкреслено високу обчислювальну складність практичних задач і потребу у компромісі між оптимальністю та швидкістю розрахунку.

На дійсно-орієнтоване обслуговування (Reliability -Centered Maintenance, RCM) часто використовують для ранжування компонентів за критичністю та вибору типів ТО. Сучасні публікації демонструють поєднання RCM із reliability block diagram та індексами критичності для визначення пріоритетів компонентів рухомого складу [11]. Для кількісного відбору інтервалів ППТО корисними є прикладні “data-driven” кейси на базі розподілу Вейбулла і функцій вартості, наприклад для гальмівної системи легкорейкового транспорту [12].

Ризик-орієнтовані рішення також розвиваються в суміжних областях, де поєднуються імовірнісні моделі з теорією корисності/втрат. Наприклад, Hughes та ін. пропонують ймовірнісну risk-based схему прийняття рішень у SHM, яка концептуально близька до задач RBM у ТО (оцінка стану \rightarrow ризик \rightarrow рішення) [13].

Для економічної оцінки ефекту СВМ використовують комбінації дерев відмов і Монте-Карло; прикладом є модульний підхід із динамічними деревами відмов [14].

Методологічну рамку планування інспекцій на основі ризику систематизовано у стандарті ASME PCC-3 [15], який, хоча й не є галузевим залізничним стандартом, задає логіку рівнів ризик-аналізу (якісний— кількісний) та підходів до встановлення інтервалів.

За результатами аналізу джерел можна зробити такі висновки.

Найкраще розкриті аспекти: технології моніторингу стану та сенсорика для ключових вузлів рухомого складу [1, 2, 3]; моделі інтегрованого планування ТО та обігу із використанням ILP/MILP і декомпозицій [6,7,9]; флотні постановки PdM/PHM як інструмент зменшення позапланових відмов [4,5].

Недостатньо розкриті аспекти (актуальні напрями досліджень): (1) практично відтворювані методики перетворення індикаторів стану (CBM/PdM) у рішення про інтервали ППТО та пріоритети робіт у депо; (2) узгодження “ймовірність × наслідки” із КРІ перевізного процесу (пунктуальність, доступність, рівень сервісу) та з ресурсними обмеженнями ремонтної бази; (iii) калібрування моделей надійності (зокрема Вейбулла) за обмежених та “за шумлених” даних депо; (4) інтеграція оцінки економічних наслідків (вартість простою, штрафи, вторинні пошкодження) у єдину цільову функцію для вибору інтервалів ППТО.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нижче наведено методи, які найчастіше застосовуються для вибору інтервалів ТО та формування графіків технічного обслуговування в умовах невизначеності. Для кожного методу подано коротку математичну ідею, сильні/слабкі сторони та ілюстрації.

Регламентне ППТО (time-/mileage-based). Метод передбачає виконання ТО через сталий інтервал T :

$$T = \text{const.} \quad (1)$$

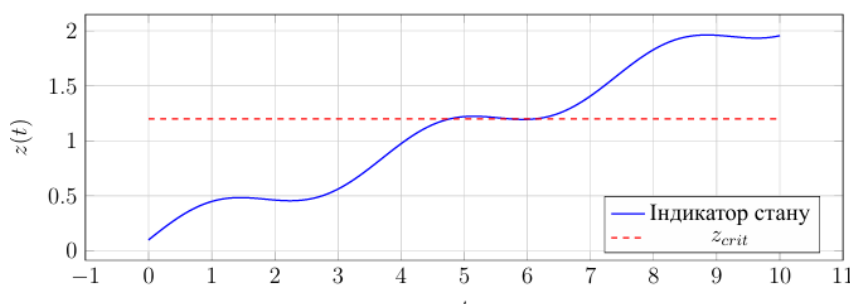


Рис. 1. Приклад порогового правила СВМ: втручання ініціюється при перетині z_{crit} .

де T — регламентний інтервал ТО (за часом або пробігом), const — фіксоване значення, встановлене нормативами/регламентом. Переваги методу – простота, прогнозоване завантаження депо, мінімальні вимоги до даних. Слабкі сторони: ігнорування індивідуальної деградації, ризик “зайвого” ТО або пропуску критичної деградації.

Reliability-Centered Maintenance (RCM) і критичність. RCM формує політику ТО на основі функцій системи, режимів відмов та їх наслідків. Для агрегування надійності часто застосовують RBD-моделі. Для послідовної структури (2):

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (2)$$

де $R_{sys}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи системи до моменту t (для послідовної структури), $R_i(t)$ — надійність i -го елемента, n — кількість елементів, t — час/пробіг. Сильні сторони методу: орієнтація на безпеку та критичні функції; прозорі підстави для пріоритизації [11]. Слабкі сторони: висока трудомісткість аналізу FMESCA/RCM; потреба у експертних оцінках і даних.

Condition-Based Maintenance (CBM) за порогами. CBM виконує втручання за досягнення порога індикатора стану $z(t)$:

$$\text{ТО, якщо } z(t) \geq z_{crit}. \quad (3)$$

де $z(t)$ — індикатор (метрика) технічного стану в момент t , z_{crit} — критичний поріг (граничне значення), при досягненні якого ініціюється ТО, t — час/пробіг. Сильні сторони – зменшення зайвих втручань; раннє виявлення деградації [2, 3]. Слабкі сторони: вартість сенсорика/даних; складність встановлення робочих порогів. На рис 1 наведено приклад порогового правила СВМ.

Predictive Maintenance / PHM (PdM/PHM) і оцінка RUL. PdM/PHM планує втручання, використовуючи прогноз залишкового ресурсу (див. формулу (4)):

$$RULd = f(x(t)), \quad (4)$$

де $f(\cdot)$ — модель/алгоритм прогнозування (RUL—оцінка залишкового ресурсу (Remaining Use ful регресія, ML-модель або фізична модель деградації), $x(t)$ — вектор ознак у момент t (показники діагностики, сенсорні вимірювання та умови експлуатації), t — поточний час/пробіг. У флотних задачах PdM є найбільш ефективним, коли інтегрований із плануванням експлуатації та обмеженнями депо [4, 5]. Сильні сторони: зменшення позапланових відмов, адаптивність. Слабкі сторони: висока складність, ризик змішень через дрейф даних і зміну умов.

Математична оптимізація графіків ТО (ILP/MILP, мережеві моделі). Інтегровані задачі “обіг—ТО—ресурси” часто формалізують у вигляді ILP/MILP (див. формулу (5)):

$$\min c^T x \text{ s.t. } Ax \leq b, x \in \{0, 1\}^m. \quad (5)$$

де x — вектор бінарних змінних рішень (наприклад, призначення робіт/вікон ТО), c — вектор питомих витрат/штрафів, A —матриця обмежень, b —вектор правих частин, m — кількість змінних; нерівність $Ax \leq b$ описує ресурсні, часові та технологічні обмеження. Переваги методу можливість врахувати численні обмеження (вікна, ресурси, локації) і отримати оптимальне/квазіоптимальне рішення [6, 7, 9]. Слабкі сторони: обчислювальна складність; потреба у спрощеннях і точних даних.

Імітаційне моделювання (DES) для оцінки політик ТО. DES застосовують для відтворення потоків постановки у депо, черг ресурсів і впливу невизначеності тривалостей. Показник, наприклад, середній час циклу може оцінюватися як (див. формулу (6)):

$$\bar{T}_{cycle} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t_k^{out} - t_k^{in}). \quad (6)$$

де T_{cycle} — середня тривалість циклу обслуговування/перебування у системі, N — кількість змодельованих циклів (заявок/постановок), t_k^{in} — час входу k -го об'єкта в систему (прибуття/постановка), t_k^{out} — час виходу (завершення ТО/випуск). Сильні сторони: реалістичність, можливість моделювати складні правила й стохастичку. Слабкі сторони: потреба у калібруванні й валідації; відсутність “закритої” оптимальності [16].

Risk-Based Maintenance (RBM) із параметричною моделлю надійності

У RBM ризик можна подати як (див. формулу (7)):

$$Risk(t) = P(X \leq t) \cdot C_{cons}, \quad (7)$$

де $Risk(t)$ — очікуваний ризик/очікувані втрати до віку t , $P(X \leq t) = F(t)$ — імовірність відмови до моменту t , X — випадкова величина “час до відмови”, C_{cons} — узагальнена вартість (наслідки) відмови.

Для розподілу Вейбулла (див. формулу (8)):

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right), \quad h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

де $F(t)$ — функція розподілу (ймовірність відмови до t), $h(t)$ — інтенсивність відмов (hazard rate), β — параметр форми, η — параметр масштабу (характерний час/пробіг), t — вік/пробіг компонента. Сильні сторони: пряме узгодження інтервалів із прийнятним ризиком і наслідками; природна пріоритизація. Слабкі сторони: складність оцінювання C_{cons} та калібрування параметрів за обмежених даних [15, 13].

Графічне порівняння $h(t)$ наведено на рис. 2.

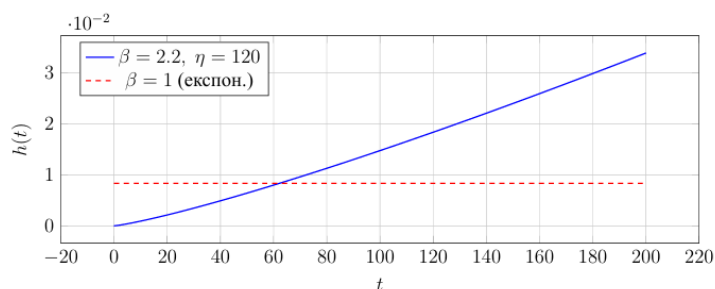


Рис. 2. Порівняння інтенсивності відмов $h(t)$: зростаючий Вейбулл ($\beta > 1$) та сталий експоненційний випадок

Для задачі вибору міжремонтних інтервалів ППТО з урахуванням ризику відмов у межах цієї роботи обрано RBM у поєднанні з параметричною моделлю Вейбулла та спрощеною економічною функцією втрат. Вибір обґрунтовано тим, що: метод напряду пов'язує інтервал ТО з імовірністю відмови та наслідками; потребує порівняно невеликого набору параметрів для демонстраційного експерименту; може бути природно розширений до CBM/PdM (через оновлення параметрів ризику за даними) та інтегрований з MILP/DES для врахування ресурсних обмежень у подальших дослідженнях.

Планування й проведення експерименту.

Мета експерименту — визначити раціональний інтервал ППТО T^* за критерієм мінімізації очікуваних питомих втрат за політикою “вікової” заміни (agereplacement).

Приймаємо, що час до відмови X має розподіл Вейбулла з параметрами β і η . Якщо відмова трапляється до віку T , виконується коригувальне втручання з вартістю C_{CM} ; якщо відмови не сталося до T , виконується планове ТО з вартістю C_{PM} .

Для демонстрації приймаємо параметри: $\beta = 2.2$, $\eta = 120$ (умовні одиниці часу/пробігу), $C_{PM} = 1$, $C_{CM} = 8$.

5.2. Математична модель (демонстраційна). Ймовірність відмови до моменту T визначається формулою (9):

$$F(T) = P(X \leq T) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (9)$$

де $F(T)$ — функція розподілу часу до відмови (ймовірність відмови до віку T), $P(\cdot)$ — ймовірність події, X — випадкова величина “час до відмови”, T — інтервал ППТО (вік/пробіг, на якому виконують планове втручання), $\exp(\cdot)$ — експонента, β — параметр форми Вейбулла, η — параметр масштабу Вейбулла.

Ймовірність безвідмовної роботи (див. формулу(10)):

$$R(T) = 1 - F(T) = \exp\left(-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right). \quad (10)$$

де $R(T)$ — функція надійності (ймовірність, що відмова не станеться до T), а співвідношення $R(T) = 1 - F(T)$ є загальною тотожністю для неперервного розподілу.

Очікувана вартість одного циклу (планове ТО або коригувальний ремонт) задається формулою (11):

$$E[C(T)] = C_{CM}F(T) + C_{PM}R(T). \quad (11)$$

де $E[C(T)]$ — математичне сподівання (очікувана вартість) одного циклу за інтервалу T , $C(T)$ — випадкова вартість циклу, C_{CM} — вартість коригувального ремонту (якщо відмова сталася до T), C_{PM} — вартість планового ТО (якщо відмови до T не було); множники $F(T)$ та $R(T)$ виступають відповідними ймовірностями сценаріїв.

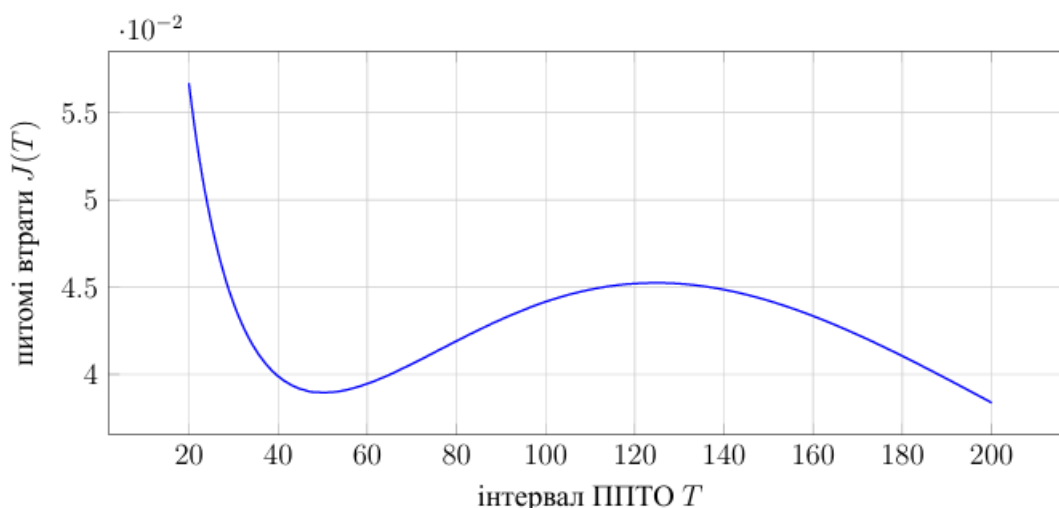


Рис. 3. Демонстраційна залежність $J(T)$ від інтервалу ППТО: компроміс між плановими втручанням та втратами від відмов

Для спрощеної оцінки питомих втрат використаємо формулу (12):

$$J(T) = \frac{E[C(T)]}{T} \quad (12)$$

де $J(T)$ — питомі (на одиницю часу/пробігу) очікувані втрати за політикою “вікової” заміни з інтервалом T ; чисельник $E[C(T)]$ — очікувані витрати за цикл, знаменник T — довжина інтервалу між плановими втручаннями.

Примітка: у більш строгій постановці у знаменнику використовується $E[\min(X, T)]$; тут застосовано спрощення для наочного експерименту.

Результати експерименту.

Побудуємо графік $J(T)$ та визначимо область мінімуму (див. рис. 3).

Для контрольної перевірки порівняємо кілька значень.

Експеримент показує, що навіть у спрощеній постановці існує область раціональних інтервалів ППТО: зменшення T знижує ймовірність відмов, але збільшує частоту планових робіт; збільшення T зменшує частоту ППТО, але різко підвищує очікувані втрати від коригувальних ремонтів. Отримана методика може бути розширена шляхом (i) введення явного обмеження на ризик, (ii) використання $E[\min(X, T)]$ у знаменнику, (iii) інтеграції ресурсних обмежень депо через MILP або DES.

Висновки. Розкрито актуальність оптимізації ППТО рухомого складу та обґрунтовано доцільність переходу до ризик-орієнтованого планування, яке враховує ймовірність відмови та наслідки для безпеки й експлуатації.

На основі аналізу сучасних публікацій систематизовано підходи RCM, CBM, PdM/PHM, оптимізаційні моделі графіків ТО та ризик-орієнтовані фреймворки; визначено прогалини, пов’язані з інтеграцією “ймовірність×наслідки” з KPI та ресурсними обмеженнями депо.

Виконано огляд методів сучасної науки й практики та обґрунтовано вибір RBM+Вейбулл як базового підходу для задачі вибору інтервалів ППТО.

Проведено демонстраційний експеримент і показано наявність компромісу між частотою планових робіт і втратами від відмов, що дозволяє визначати область раціональних інтервалів ППТО.

Результати демонструють елементи наукової новизни:

1. постановку задачі оптимізації інтервалів ППТО у термінах “очікувані втрати + ризик” з використанням параметричної моделі надійності (Вейбулл) для кількісного зв’язку між інтервалом ТО та ймовірністю відмови;

2. демонстрацію відтворюваної процедури експериментальної оцінки раціонального інтервалу ППТО та аналізу чутливості до співвідношення вартостей планового й коригувального втручання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

1. калібрування параметрів Вейбулла за фактичними даними депо та врахування цензурованих спостережень;

2. інтеграцію RBM із CBM/PdM (оновлення ризику за даними діагностики) та з ресурсними обмеженнями депо (MILP/DES);

3. формалізацію наслідків відмов через KPI перевізного процесу (затримки, доступність, SLA) і розроблення правил пріоритетизації ремонтних робіт.

Література

1. Kundu P., Darpe A. K., Singh S. P., Gupta K. A review on condition monitoring technologies for railway rolling stock. *PHM Society European Conference*. 2018. Vol. 4, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.36001/phme.2018.v4i1.483>
2. Kostrzewski M., Melnik R. Condition monitoring of rail transport systems: a bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. P. 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21144710>
3. Robust sensors enabling condition-based maintenance of lubricated components in locomotives and wagons. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3236–3243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.891>
4. Andrews J. et al. PHM for railway systems and mass transportation (special issue editorial). *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2020. Vol. 11, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2020.v11i2.2933>
5. International Journal of Prognostics and Health Management. [Journal Profile/Editorial Information]. 2020.
6. Dynamic fleet maintenance management model applied to rolling stock. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 240. Art. 109607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109607>
7. Maintenance scheduling within rolling stock planning in railway operations under uncertain maintenance durations. *Journal of Rail Transport*

- Planning & Management*. 2020. Vol. 12. Art. 100177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100177>
8. Zomer J., Besinovic N., de Weerd M. M., Goverde R. M. P. The maintenance scheduling and location choice problem for railway rolling stock. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.00454>
 9. Elhfcseyeni M., Kocuk B. A stochastic programming approach to the railcar maintenance problem with service level and track capacity considerations. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2509.08427>
 10. Joint optimization method for preventive maintenance and train scheduling of subway vehicles based on a spatiotemporal network graph. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 8. P. 4138. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15084138>
 11. Models and algorithms for the preventive maintenance optimization of railway vehicles. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 240. Art. 122589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122589>
 12. Identifying critical components for railways rolling stock reliability: a case study for Iran. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 2854. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52037-1>
 13. Corman F., Kraijema S., Godjevac M., Lodewijks G. Optimizing preventive maintenance policy: a data-driven application for a light rail braking system. *Proc IMechE, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2017. Vol. 231, No. 5. P. 534–545. DOI: <https://doi.org/10.1177/1748006X17719409>
 14. Hughes A. J. et al. A probabilistic risk-based decision framework for structural health monitoring. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.01521>
 15. Southgate J. M., Groth K., Sandborn P., Azarm S. Cost-benefit analysis using modular dynamic fault tree analysis and Monte Carlo simulations for condition-based maintenance. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.09519>
 16. ASME PCC-3: Inspection Planning Using Risk-Based Methods. New York : ASME, 2022.
 17. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2015.
- References**
1. Kundu P., Darpe A. K., Singh S. P., Gupta K. A review on condition monitoring technologies for railway rolling stock. *PHM Society European Conference*. 2018. Vol. 4, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.36001/phme.2018.v4i1.483>
 2. Kostrzewski M., Melnik R. Condition monitoring of rail transport systems: a bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. P. 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21144710>
 3. Robust sensors enabling condition-based maintenance of lubricated components in locomotives and wagons. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3236–3243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.891>
 4. Andrews J. et al. PHM for railway systems and mass transportation (special issue editorial). *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2020. Vol. 11, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2020.v11i2.2933>
 5. International Journal of Prognostics and Health Management. [Journal Profile/Editorial Information]. 2020.
 6. Dynamic fleet maintenance management model applied to rolling stock. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 240. Art. 109607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109607>
 7. Maintenance scheduling within rolling stock planning in railway operations under uncertain maintenance durations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2020. Vol. 12. Art. 100177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100177>
 8. Zomer J., Besinovic N., de Weerd M. M., Goverde R. M. P. The maintenance scheduling and location choice problem for railway rolling stock. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.00454>
 9. Elhfcseyeni M., Kocuk B. A stochastic programming approach to the railcar maintenance problem with service level and track capacity considerations. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2509.08427>
 10. Joint optimization method for preventive maintenance and train scheduling of subway vehicles based on a spatiotemporal network graph. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 8. P. 4138. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15084138>
 11. Models and algorithms for the preventive maintenance optimization of railway vehicles. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 240. Art. 122589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122589>
 12. Identifying critical components for railways rolling stock reliability: a case study for Iran. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 2854. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52037-1>
 13. Corman F., Kraijema S., Godjevac M., Lodewijks G. Optimizing preventive maintenance policy: a data-driven application for a light rail braking system. *Proc IMechE, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2017. Vol. 231, No. 5. P. 534–545. DOI: <https://doi.org/10.1177/1748006X17719409>
 14. Hughes A. J. et al. A probabilistic risk-based decision framework for structural health monitoring. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.01521>
 15. Southgate J. M., Groth K., Sandborn P., Azarm S. Cost-benefit analysis using modular dynamic fault tree analysis and Monte Carlo simulations for condition-based maintenance. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.09519>

16. ASME PCC-3: Inspection Planning Using Risk-Based Methods. New York : ASME, 2022.
17. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

Dolia K.V. Optimization of planned and preventive maintenance of rolling stock taking into account the risk of failures.

The paper considers the problem of increasing the efficiency of planned preventive maintenance (PPTO) of rolling stock by moving from rigidly fixed scheduled intervals to risk-based planning (Risk-Based Maintenance, RBM). The relevance of the topic is due to the simultaneous increase in requirements for safety and punctuality of transportation, aging of the fleet and increasing the cost of downtime, while the throughput capacity of the depot (posts, personnel, spare parts) remains limited. In such conditions, the same maintenance intervals for all units of equipment are a compromise: for some of the rolling stock they are overly conservative and cause unnecessary costs, for others they create an increased probability of failures in motion. The key idea of RBM is to coordinate the periodicity and priorities of PPTO with the probability of failure and the consequences of failure. The consequences in railway systems are multi-component and include safety effects, operational losses (delays, schedule disruption, reduced fleet availability) and economic costs (repairs, downtime, fines). The purpose of the study is to propose and justify an approach to choosing maintenance intervals that minimizes the expected total losses while ensuring an acceptable level of risk. The methodological basis of the

work combines a review of modern concepts of maintenance, RCM, CBM and PdM/PHM with the formalization of the “cost + risk” problem based on parametric reliability models. For a quantitative description of degradation, a time-to-failure model with a Weibull distribution was used, which allows us to relate the maintenance interval T to the failure probability $F(T)$ and the expected costs for planned and corrective intervention. A demonstration example was used to calculate a rational maintenance interval and conduct a sensitivity analysis to the ratio of the costs of planned and emergency work. The existence of a region of optimal (rational) intervals is shown, in which a compromise is achieved between the frequency of planned work and losses from failures. The results obtained can be used as a basis for further integration with condition monitoring data (CBM/PdM) and for expanding the statement by introducing explicit risk constraints and depot resource constraints.

Keywords: rolling stock, maintenance, planned preventive maintenance, failure risk, reliability, Weibull distribution, RCM, CBM, PdM..

Доля Костянтин Вікторович – д.т.н., проф., кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна. ORCID 0000-0002-4693-9158 k.v.dolia@gmail.com

Стаття подана 19.11.2025.