

УДК 629.42

ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ЗАМІНИ РЕМОНТНОГО ОБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО В РАЗІ ЙОГО ЗНОСУ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, кандидати техн. наук О. О. Шапатіна, О. М. Обозний,
старш. викл. О. О. Анацький

DEVELOPMENT OF THE STRATEGY FOR THE REPLACEMENT OF THE LOCOMOTIVE DEPOT REPAIR EQUIPMENT IN CASE ITS WEAROUT

Dr. Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina,
PhD (Tech.) O. Oboznyi, senior lecturer O. Anatskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.341946>



Анотація. Через високі вимоги щодо забезпечення ефективного функціонування ремонтного обладнання локомотивного депо потрібно уважно реагувати на своєчасні заміни зношеного і морально застарілого обладнання. Разом із тим вартість цього унікального обладнання потребує ретельного і всебічного дослідження цих проблем.

У статті на підставі первинної інформації про вартість ремонтного обладнання і моніторинг процесів його зносу розглянуто методику формування стратегії оптимальних термінів їх заміни. Розглянуто завдання визначення терміну заміни обладнання в разі невідповідного (контрольованого) зносу і випадкового (аварійного) зносу ремонтного обладнання локомотивного депо.

Ключові слова: стратегія заміни обладнання, оптимальний термін заміни, ремонтне обладнання.

Abstract. High requirements for ensuring the efficient operation of the repair equipment of the locomotive depot require a careful response to the timely replacement of worn and obsolete equipment. However, the cost of this unique equipment requires a thorough and comprehensive study of these issues.

In the article, on the basis of primary information about the cost of repair equipment, monitoring the processes of its wear and tear, the technique of forming a strategy for substantiating the optimal terms of their replacement is considered. The tasks of determining the term of equipment replacement in case of non-accidental (controlled) wear and accidental (emergency) wear of repair equipment of the locomotive depot are considered.

With known equipment maintenance costs for the period of operation and its initial cost, the procedure for finding the optimal term for its replacement is determined.

A mathematical model has been developed that takes into account the ratio of the initial cost of the equipment and its maintenance costs, and the ratio of the coefficients of growth over time of the equipment maintenance costs and the reduction of its initial price. On the basis of this, graphical dependencies are built, which allow you to reasonably determine the optimal terms for replacing technological equipment.

For the general case of an accidental change in the technical condition of the equipment and, accordingly, an increase in the costs of its maintenance, a method of determining the optimal term for its replacement is proposed.

Keywords: equipment replacement strategy, optimal replacement period, repair equipment.

Вступ. Багато років на рівні галузі порушували питання про необхідність оновлення тягового рухомого складу та інфраструктури всіх підрозділів залізниць. Флагман українського локомотивобудування Луганський локомотивобудівний завод уже декілька років виведений із промислової і господарської власності України, а інші заводи працюють не на повну потужність за рядом об'єктивних причин.

Така сама ситуація, на жаль, характерна для локомотивремонтного господарства. Заводи і депо працюють не на повну потужність або просто не мають необхідного обладнання для якісного проведення ТО, ПР, КР. Оновлення ремонтної інфраструктури відбувається неритмічно, а в деяких випадках підприємства самостійно закупають нове обладнання, використовуючи його як альтернативу старому обладнанню.

Усе це негативно впливає на реалізацію завдань із забезпечення надійної і ефективної роботи локомотивного парку.

Необхідно запровадити політику оновлення ремонтного обладнання з урахуванням не тільки наявності закордонного ремонтного і діагностичного обладнання, а й обґрунтованих стратегій своєчасного його оновлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід експлуатації ТРС показав на необхідність удосконалення стратегії і технології ремонту як основного завдання утримання і забезпечення ефективної і надійної його роботи. Так, у дослідженнях [1-3] були узагальнені теоретичні питання забезпечення ефективної роботи ТРС за рахунок оптимізації і коректування обсягів ТО, ПР.

Одночасно проводили дослідження, що враховували оптимальні витрати на експлуатацію ТРС за його життєвий цикл [1, 2, 6].

Значна кількість досліджень присвячена запровадженню в систему ТО,

ПР ТРС сервісу на основі моніторингу його технічного стану [4, 5].

Ще один напрям пов'язаний з обґрунтуванням обсягів модернізації ТРС з метою подовження його ефективного використання. Теоретичні дослідження щодо забезпечення ефективності роботи технічних об'єктів розглянуті в роботах [5, 6].

Але в сучасних умовах залишається актуальним завдання визначення оптимального терміну експлуатації ТРС і ремонтного обладнання для виконання ТО, ПР.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження полягає в узагальненні і обґрунтуванні заходів із визначення оптимального періоду заміни ремонтного обладнання, виходячи з динаміки витрат на його експлуатацію, ремонт і заміну.

Відповідно з метою статті поставлені такі завдання:

1. Обґрунтувати термін ефективної заміни обладнання за відомими даними про витрати на його утримання і початкову його вартість.

2. З урахуванням витрат на придбання технологічного обладнання і його утримання і динаміки витрат вартості обладнання і зростання витрат на утримання визначити оптимальний термін його заміни.

3. Визначити термін ефективної роботи обладнання та зміни його технічного стану.

Основна частина дослідження. Ремонтне господарство локомотивних депо забезпечує проведення необхідного обсягу відновлювальних робіт для забезпечення ефективної експлуатації локомотивів.

Разом із тим як локомотивний парк, так і ремонтне господарство локомотивних депо досягло термінів, що значно перевищують їхній нормативний термін експлуатації, а це обумовлює вирішення завдань, що направлені на обґрунтування термінів оновлення ремонтного обладнання.

Це передбачає вибрати такі терміни заміни ремонтного обладнання або порядок

його заміни, за яких будуть мінімізовані сумарні витрати на виконання заданого обсягу ТО, ПР локомотивів.

При цьому завдання заміни обладнання є по суті завданнями динамічними, бо відповідають динаміці процесу заміни.

А саме потребу в ремонтному обладнанні можна приймати змінною в часі або приблизно вважати постійною; можна враховувати або не враховувати зміну витрат на експлуатацію, ефективність капіталовкладень, зміну амортизаційних відрахувань, враховувати або не враховувати технічний процес, що обумовлює можливість отримання більш сучасного обладнання.

Загалом у практиці прийнято такі стратегії заміни ремонтного обладнання: планова заміна; заміна з виходом із ладу; змішана стратегія. При цьому передбачено заходи, що можуть забезпечувати збільшення терміну експлуатації обладнання за рахунок удосконалення ТО, ПР.

Нове обладнання обирають або того самого типу, що є в експлуатації, або нового типу, що є у продажу, або спеціально розробляють.

При цьому старе обладнання може бути використане в інших менш відповідальних виробництвах або продано чи списано на металобрухт.

Розглянемо завдання заміни ремонтного обладнання за контрольованого його зношування, беручи умовні вихідні дані.

Нехай є деяке обладнання, витрати на придбання і встановлення якого складають k , а витрати на експлуатацію складали C_i за i -й рік. Із часом витрати C_i зростають через зношування і необхідність корегування обсягів відновлювальних робіт.

Необхідно визначити оптимальний термін заміни обладнання за умови мінімізації сумарних витрат на придбання і експлуатацію, якщо обладнання, яке замінюють, не використовують.

Коли зважати на різні значення витрат, зроблених у різний час, то середні річні витрати можна оцінити за формулою

$$\gamma = \frac{k + \sum_{i=1}^n \alpha^{i-1} C_i}{n}, \quad (1)$$

де n – оптимальний термін заміни ремонтного обладнання;

$$\alpha = 1/(1+E), \quad (2)$$

де E – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Користуючись цією формулою, можна знайти оптимальну величину терміну заміни ремонтного обладнання.

Так, нехай умовно деяке обладнання коштує $6 \cdot 10^4$ грн, $E = 0,15$, витрати на його експлуатацію за рік залежно від терміну експлуатації наведені в табл. 1.

Розрахунки за допомогою формул (1) і (2) наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Витрати на експлуатацію обладнання за рік залежно від терміну експлуатації

Рік Витрати за рік	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C_i, 10^3$ грн	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Таблиця 2

Розрахунок оптимального терміну заміни ремонтного обладнання

Рік Показник	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_i, 10^3 \text{ грн}$	60									
$C_i, 10^3 \text{ грн}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
α^{i-1}	1	0,952	0,91	0,86	0,82	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64
$\alpha^{i-1} \cdot C_i$	5	9,52	13,7	17,2	20,5	23,4	25,9	28,4	30,2	32
$k + \sum_{i=1}^n \alpha^{i-1} C_i$	65	74,52	88,2	105,4	125,9	148,3	174,4	202,6	232,3	264,8
γ_i	65	37,3	29,4	26,4	25,2	24,8	24,9	25,3	25,8	26,5

Із результатів розрахунків видно, що оптимальний термін заміни ремонтного обладнання, якщо $\gamma = 24,8$, складає $n = 6$, тобто через шість років після експлуатації ремонтне обладнання доцільно замінити.

У випадку, коли зношене обладнання планують продати, для визначення терміну виключення його з обігу треба врахувати такі чинники.

Вартість ремонтного обладнання залежно від терміну експлуатації можна подати як

$$k = A_0(1 - e^{\alpha t}), \quad (3)$$

де A_0 – первинна ціна ремонтного обладнання;

α – коефіцієнт, що враховує втрату вартості ремонтного обладнання (приймають за статистичними даними після обробки динаміки витрат).

Сумарні витрати на ремонт і підтримання ремонтного обладнання за час t

$$C = C_0 e^{bt}, \quad (4)$$

де C_0 – сумарні витрати на ремонт і утримання обладнання за перший рік експлуатації обладнання;

b – коефіцієнт, що враховує зростання вартості витрат на ремонт і підтримання технічного стану ремонтного обладнання (визначають після обробки статистичних даних щодо динаміки вартості витрат аналогічного обладнання).

Тоді сумарні витрати дорівнюватимуть

$$z = A_0(1 - e^{\alpha t}) + C_0 e^{bt}. \quad (5)$$

А приведені сумарні річні витрати дорівнюватимуть

$$\gamma(t) = \frac{A_0(1 - e^{\alpha t}) + C_0 e^{bt}}{t}. \quad (6)$$

Для визначення оптимального терміну заміни обладнання про диференціюємо цю функцію і прирівняємо її до нуля:

$$-\frac{1}{t^2}(A_0 - A_0 e^{\alpha t} + C_0 e^{bt}) + \frac{1}{t}(-A_0 \alpha e^{\alpha t} + C_0 b e^{bt}) = 0. \quad (7)$$

Після спрощення отримаємо остаточно

$$\frac{e^{bt}(1+bt)}{e^{\alpha t}(1+\alpha t)-1} = \frac{A_0}{C_0}. \quad (8)$$

Отже, результатом оптимального значення заміни обладнання є функція

$$t = f(A_0, C_0, \alpha, b) \rightarrow opt. \quad (9)$$

Використовуючи програму Excel, визначаємо графічну залежність $\gamma(t) = 0$ (рис. 1-5).

Як видно з наведених графічних залежностей, на характер зміни терміну можливого продажу ремонтного обладнання значно впливає рівень значень

коефіцієнтів a , b і співвідношень A_0/C_0 . Орієнтуючись на експлуатаційні або дослідні значення цих параметрів, можна наглядно оцінювати терміни завершення експлуатації ремонтного обладнання для можливої його реалізації на сторону.

Для обліку випадкових моментів виходу устаткування з ладу необхідно знати характеристики його надійності. Це насамперед інтенсивність відмов $\lambda(t)$, тобто імовірність відмови устаткування в інтервалі часу $t \pm \Delta t$.

Знаючи цю характеристику, можна визначити імовірність відсутності відмов протягом часу t :

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (10)$$

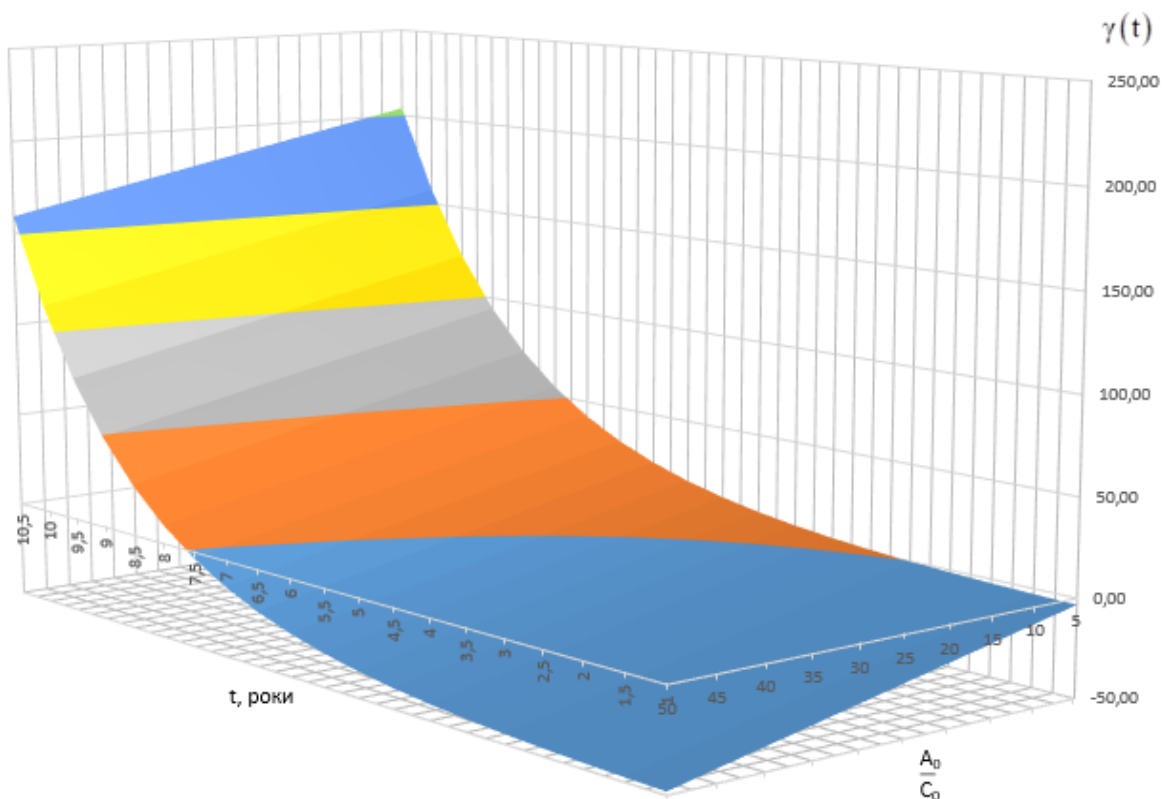


Рис. 1. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 5$, $b = 5,5$)

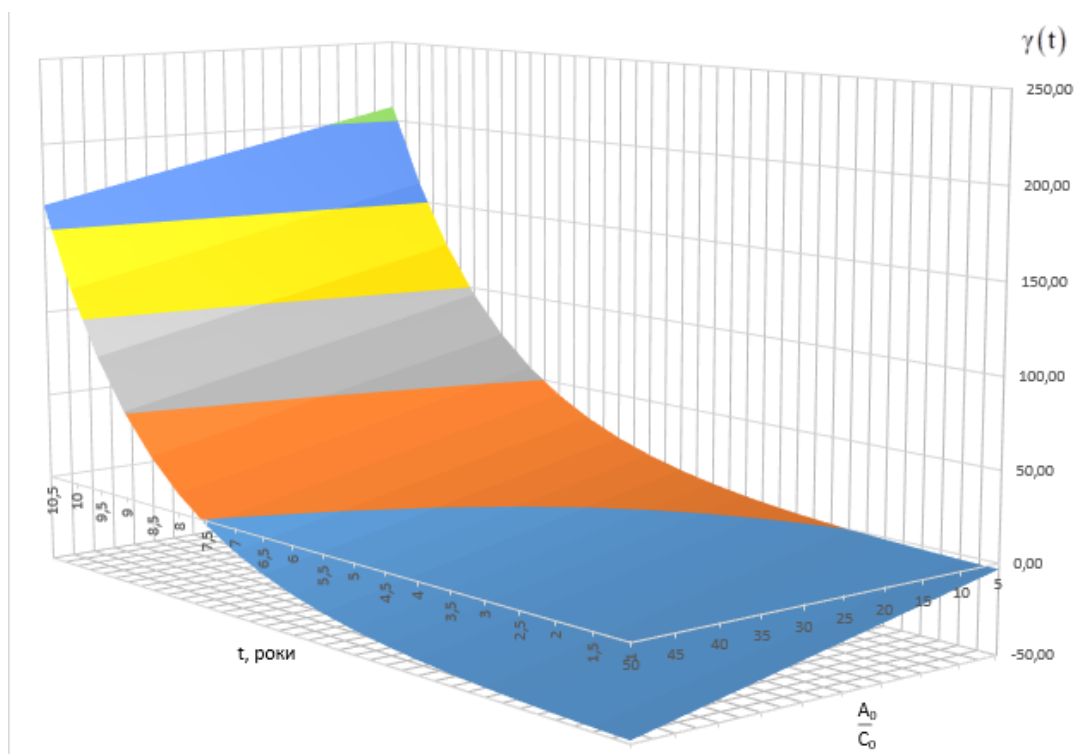


Рис. 2. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 4, b = 4,5$)

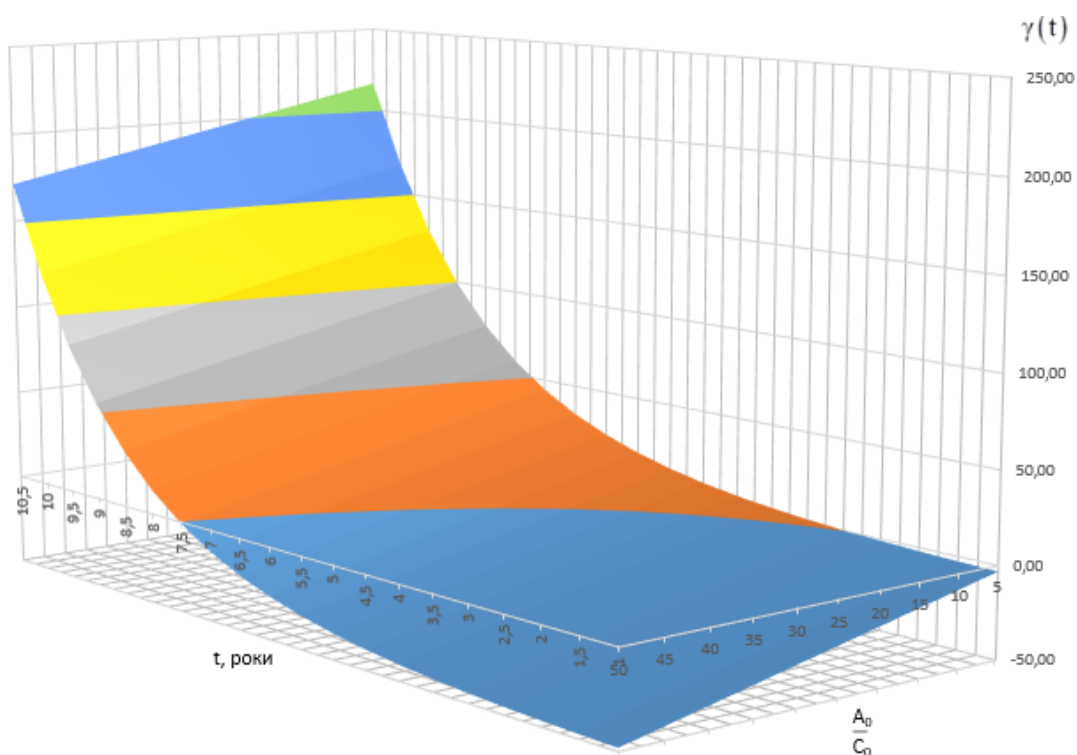


Рис. 3. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 3, b = 3,5$)

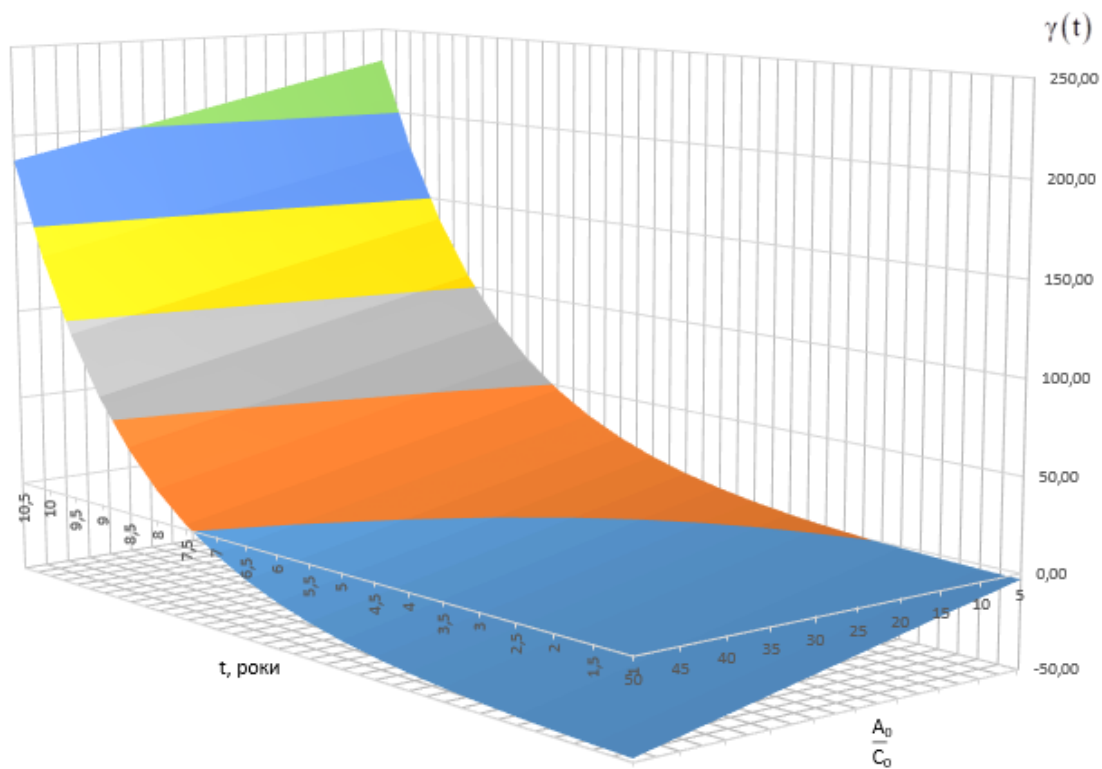


Рис. 4. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 2, b = 2,5$)

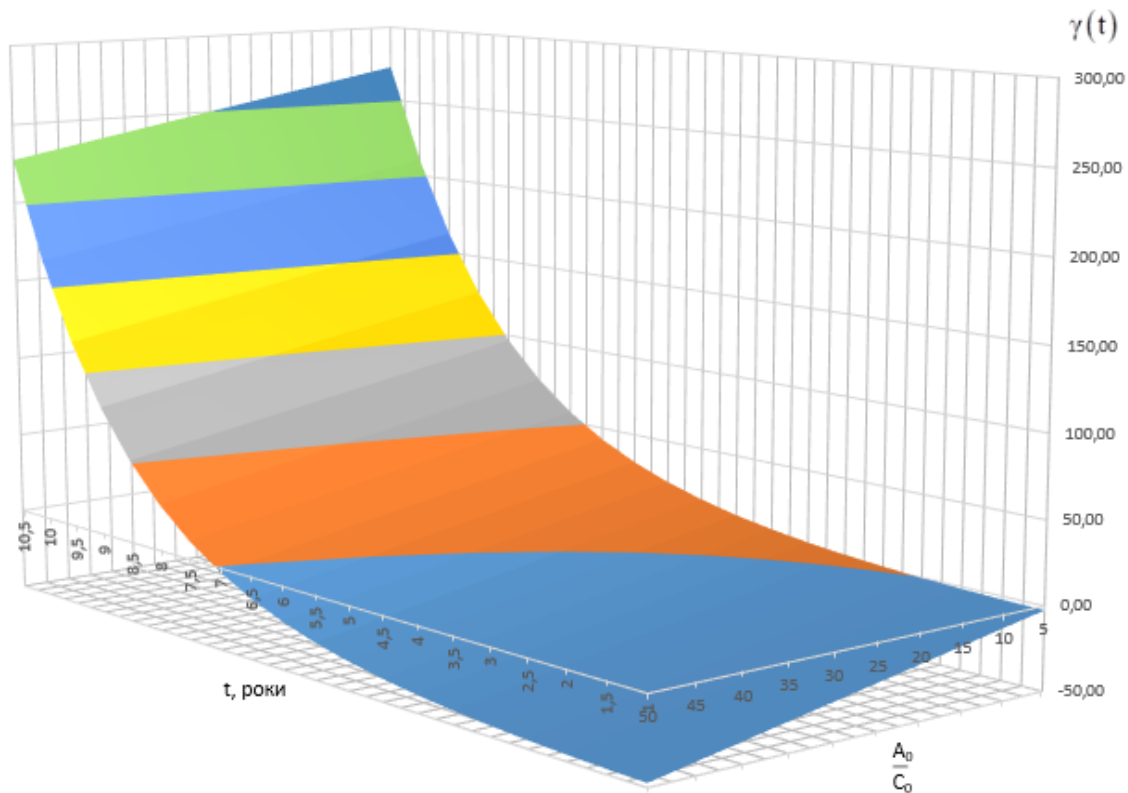


Рис. 5. Функція $\gamma(t) = f(A_0, C_0, \alpha, b) = 0$ ($a = 1, b = 1,5$)

У теорії заміни її називають кривою живучості і позначають символом v .

Нехай N одиниць обладнання використовують одне за іншим (із виходом з ладу). Для них відомі криві живучості $v(t)$.

Потрібно визначити час H_{cp} роботи системи із цих одиниць.

Очевидно, що

$$H_{cp} = Nt_{cp}, \quad (11)$$

$$\sigma_H = \sqrt{N} \sigma_p. \quad (12)$$

У загальному випадку існує рекурентна формула

$$P_0(t) = v(t); \quad (13)$$

$$P_1(t) = - \int_0^t v(t-u) df(u); \quad (14)$$

.....

$$P_m(t) = - \int_0^t P_{m-1}(t-u) df(u). \quad (15)$$

Якщо крива живучості $v(t)$ є експонентою, то

$$P_m(t) = \frac{(\lambda_0 t)^m \exp(-\lambda_0 t)}{m!}. \quad (16)$$

Це розподіл Пуассона. Обчислимо середні витрати цих одиниць обладнання і їхнє середньоквадратичне відхилення:

$$m_{cp}(t) = \lambda_0 t; \quad (17)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\lambda_0 t}. \quad (18)$$

Кількість експлуатованих до певного моменту часу одиниць обладнання

$$f_1(t) = N_0 v(t) + \int r'(u) v(t-u) du, \quad (19)$$

де N_0 – початкова кількість одиниць обладнання;

$r(u)$ – кількість одиниць обладнання, замінені до моменту часу u .

Це рівняння Вольтерра, за яким можна встановити зв'язок між функцією заміни обладнання $r(u)$, законом живучості $v(t)$ і кількістю експлуатованого обладнання $f_1(t)$. Якщо $f_1(t) = \text{const}$ ($t > 0$), а $v(t)$ – експонента, то

$$r(t) = N_0 \lambda_0 t. \quad (20)$$

У тих випадках, коли устаткування замінюють за планом (групою), витрати на одиницю з такою заміною C_1 менші, ніж із позаплановою заміною C_2 (тоді доводиться найчастіше шукати несправність і зупиняти надовго процес виробництва і т. д.).

Витрати в одиницю часу

$$\gamma(t) = \frac{C_1 N_0}{t} + \frac{C_2 r(t)}{t}, \quad (21)$$

де $r(t)$ – інтегральна функція заміни обладнання, що забезпечує роботу N_0 одиниць обладнання.

Обчислимо t_0 , що забезпечує мінімум $\gamma(t)$:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{C_2 r'(t)t - [C_1 N_0 + C_2 r(t)]}{t^2} = 0. \quad (22)$$

Звідси

$$C_2 r'(t_0) = \frac{C_1 N_0 + C_2 r(t_0)}{t_0}. \quad (23)$$

Знаючи $r(t)$, можна обчислити конкретну величину t_0 , тобто оптимальний час планової заміни обладнання.

Нехай на потоковій лінії з ремонту тягових електричних двигунів є деяка кількість N_0 однотипних транспортних засобів, які забезпечують постачання комплектуючих. Функція живучості їхня така, що функція заміни транспортних засобів описана залежністю

$$r(t) = N_0 \lambda t^2, \quad (24)$$

де $\lambda=0,01$ відмова/р.

Вартість планової заміни транспортних засобів 1000 грн, вартість позапланової заміни 6250 грн. Визначимо оптимальний термін планової заміни транспортних засобів.

Підставляючи $r(t)$ у рівняння, отримане з умови мінімальних витрат, одержуємо

$$2C_2 N_0 \lambda t_0 = \frac{C_1 N_0 + C_2 N_0 \lambda t_0^2}{t_0}, \quad (25)$$

звідки

$$t_0 = \sqrt{\frac{C_1}{C_2 \lambda}}. \quad (26)$$

Підставляючи чисельні значення C_1 , C_2 і λ , одержуємо

$$t_0 = \sqrt{\frac{1000}{6250 \cdot 0,01}} = 4.$$

Отже, планову заміну транспортних засобів доцільно проводити один раз на чотири роки

Висновки. За результатами дослідження отримані такі результати.

1. За відомих витрат на утримання обладнання за період експлуатації і початкової його вартості визначено процедуру пошуку оптимального терміну його заміни.

2. Розроблено математичну залежність, яка враховує співвідношення початкової вартості обладнання і витрат на його утримання і співвідношення коефіцієнтів зростання в часі витрат на утримання обладнання і зменшення його початкової ціни. На підставі цього побудовано графічні залежності, які дають змогу обґрунтовано визначитися з оптимальними термінами заміни технологічного обладнання.

3. Загалом для випадкової зміни технічного стану обладнання і відповідно збільшення витрат на його утримання запропоновано методику визначення оптимального терміну його заміни.

Список використаних джерел

1. Тартаковський Е. Д., Уманець М. Г., Аулін Д. О. Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 72. С. 82-86.
2. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2001. Вип. 46. С. 55-58.
3. Калабухін Ю. Є., Тартаковський Е. Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2009. Вип. 111. С. 106-120.
4. Ловеїкін В. С., Ромасевич Ю. О. Теорія технічних систем. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 291 с.

5. Puzyr V., Datsun, Y., Obozny O. Design of algorithm for identification of locomotive electrical machine unit during repair. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. P. 157–161. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19727.

6. Sequential gradient-restoration algorithm for optimal control problems with nondifferential constraints / A. Miele, J. N. Damoulakis, J. R. Cloutier, J. L. Tietze. *JOTA*. 1974. № 2. P. 13.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372.

Тел.: +38 (097) 991-70-99. E-mail: alsem1512@gmail.com.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 812-48-89. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Обозний Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023.

Тел.: +38 (050) 303-45-59. E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Анацький Олександр Олександрович, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0132-8767.

Тел.: +38 (095) 737-91-66. E-mail: anatsky@kart.edu.ua.

Krashenin Oлександр, Dr.Sc (Tech.), Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7462-3372. Tel.: +38 (097) 991-70-99.

E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Shapatina Olga, PhD (Tech.), Associate Professor, department of cargo and commercial work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9185-6212. Tel.: +38 (066) 812-48-89.

E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Oboznyi Oлександр, PhD (Tech.), Associate Professor, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0843-6023. Tel.: +38 (050) 303-45-59.

E-mail: obozny@kart.edu.ua.

Anatskyi Oлександр, senior lecturer, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0132-8767. Tel.: +38 (095) 737-91-66. E-mail: anatsky@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 18.09.2025 р.