



УДК 649.42

**EFFICIENCY OF INFRASTRUCTURAL COMPONENTS OF THE
RAILWAY TRANSPORT MAINTENANCE SYSTEM
ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНФРАСТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Krashenin O.S. / Крашенінін О.С.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.*

ORCID: 0000-0001-7462-3372

Odiehov M.M. / Одієгов М.М.*Art. teacher*

ORCID: 0000-0003-3967-9009

Sharatina O.O. / Шапатіна О.О.*Art. teacher / k.t.s.,*

ORCID: 0000-0002-9185-6212

Voitenko V.V. / Войтенко В.В.*Master**Ukrainian State University of Railway Transport,**Kharkiv, Feuerbach Square 7, 61050**Український державний університет залізничного транспорту,**Харків, майдан Фейєрбаха 7, 61050*

Анотація. Традиційні підходи щодо оцінки ефективності функціонування інфраструктури підрозділів залізниць не в повній мірі враховують типи системи, що складають цю інфраструктуру. Це полягає в тому, що системи (локомотиви, вагони, верстати, будівлі, підрозділи локомотивного господарства) можуть бути довготривалої дії або короткочасної дії.

Відповідно до цього в статті розглянуті питання щодо оцінки ефективності об'єктів інфраструктури залізничного транспорту і, зокрема, локомотивного господарства.

Для цього вводяться чинники (імовірності станів системи, умовний показник ефективності системи), як сумарний результат ефективності системи за час зміни станів системи.

Ключові слова: умовний показник ефективності систем, імовірність стану системи, інтенсивність відмов

Вступ.

Для залізничної галузі актуальними питаннями залишаються питання ефективного використання об'єктів інфраструктури. Нажаль, гармонічного рішення щодо досягнення кінцевих результатів в отриманні оптимальних витрат на утримання рухомого складу поки не досягнуто [1,2]. Це полягає не тільки в своєчасному основленню локомотивного парку, а і в модернізації діючої інфраструктури ремонтного господарства локомотивних депо і переході на нові принципи його організації, в тому числі сервіс і логістику функціонування. В умовах стагнації галузі необхідні нові підходи щодо оцінки ефективності як діючої інфраструктури, так і перспективної, що робить актуальним завдання пошуку системних критеріїв оцінки роботи залізничного транспорту.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Промисловість України навіть у сучасних умовах спроможна знайти



необхідні ресурси для реорганізації галузі [1,2,3]. Як показує закордонний досвід передових країн, такі проблеми прийшлося вирішувати і у них. Це, насамперед, зважена політика в виборі ефективних виробників і власних критеріїв оцінки їх послуг. Справа йде про зацікавленість користувачів продукції в дійсно необхідних змінах в роботі локомотивного господарства.

В нашій країні і за кордоном накопичені значні наукові досягнення в питаннях оптимізації системи ТО ПР, в тому числі, як за рахунок оптимізації стратегії (міжремонтних пробігів) так і за рахунок тактики (впровадження сучасних засобів і технологій діагностування, випробувань і запровадження інноваційних технологій відновлення і моніторингу технічного стану)/4,5,6,7,9/.

Мета статті полягає в виборі відповідного показника ефективності функціонування ТРС в кожному конкретному випадку, що визначається типом (серією) ТРС, призначенням, можливістю використання для відповідного завдання тощо.

Відповідно з цим поставлені наступні задачі:

1. Визначити тип системи, що формує інфраструктуру.
2. Визначити фактори, що впливають на ефективність системи короткочасної дії.
3. Визначити фактори, що впливають на ефективність системи довготривалої дії і оцінити її.

Виклад основного матеріалу.

Сучасний рухомий склад побудований за принципами надійності та ефективності функціонування, але для забезпечення цих вимог він повинен бути наділений властивостями живучості, тобто при виході з ладу окремих елементів систем або значної зміни тих або інших робочих параметрів не призводити до повного виходу ТРС з ладу, а лише до деякого погіршення якості функціонування і зниженню ефективності роботи систем ТРС в цілому.

Для системи довгострокового використання, таких як ТРС і залізнична інфраструктура, ефективність експлуатації залежить від конкретної реалізації процесу зміни станів систем ТРС і інфраструктури їх утримання за період використання ТРС. Цей показник кількісно повинен характеризувати якість виконання ТРС завдань на перевезення вантажів і пасажирів при умові, що ТРС відповідає умовам використання, тобто експлуатується.

Слід відмітити, що за час експлуатації ТРС змінює свій стан через зміну станів апаратів, вузлів, що входять до його складу. Тому кожна реалізація процесу переходу ТРС, як системи довгострокової дії, із одного стану в інший може бути охарактеризована відповідними показниками ефективності (час перебування в експлуатації, в очікуванні ТО, ПР простої проведені ТО, ПР, тощо).

Показник ефективності відповідно з цим можна визначити таким чином [8]

$$E(t, t+t_0) = \int_{G_i} F_i dh_i(t, t+t_0), \quad (1)$$

де F_i - умовний показник ефективності функціонування ТРС для i -ої реалізації процесу експлуатації;



$dh_i(t, t+t_0)$ - елементи імовірності, що ТРС в інтервалі $[t, t+t_0]$, має i -ту реалізацію переходу з одного стану в інший.

Для визначення ефективності системи Інтегрування проводимо по простору G_i всіх можливих реалізацій процесу переходу ТРС з одного стану до іншого в інтервалі $[t, t+t_0]$.

Коли прийняти, що ТРС складається з n незалежних підсистем, кожна з яких може знаходитися лише в двох станах (працездатна і відмова), показник ефективності можна записати в розгорнутому вигляді

$$E(t, t+t_0) = F_0 h_0 + \sum_{i=0}^m h_i \int_t^{t+t_0} F_i(x_i) f_i(x_i) d(x_i) + \sum_{1 < i < j < n} h_{ij} \int_t^{t+t_0} f_i(x_i) d(x_i) \int_t^{t+t_0} F_{ij}(x_i, x_j) f_j(x_j) d(x_j) + \dots, \quad (2)$$

де $f_i(x_i)$ - щільність імовірності відмов i -ої підсистеми в момент часу (x_i) ;

h_0 - імовірність того, що підсистема ТРС не відмовить за час $[t, t+t_0]$;

Коли прийняти, що, з точки зору надійності, всі підсистеми ТРС з'єднанні послідовно, то

$$h_0 = \prod_{i=1}^m r_i(t, t+t_0)$$

h_i - імовірність того, що всі підсистеми, крім i -ої не відмовлять за час $[t, t+t_0]$.

F_0 - умовний показник ефективності ТРС за умови того, що жодна з підсистем не відмовила за час $[t, t+t_0]$;

F_i, F_{ij} - і т.д. - відповідно умовний показник ефективності ТРС при умові, що відмовила i -підсистема; j - підсистема і т.д.

В такому вигляді задача громіздка і в першому читанні доцільна наближена її оцінка, яка має похибку, що не повинна перевищувати

$$\delta - \frac{n(n-1)}{2} \max[g_i(t, t+t_0)^2 F_0]$$

де $g_i(t, t+t_0) = 1 - r_i(t, t+t_0)$ - імовірність неробочого стану i -ої підсистеми ТРС.

Розглянемо наступну ситуацію: систему матеріального постачання можна представити як систему короткочасної дії, час функціонування якої визначається потребою ремонтних господарств деяких локомотивних депо.

Нехай мається дві системи (склади), які забезпечують ремонтне господарство локомотивного депо 18 годин за добу, починаючи з 6 години ранку. Назвемо ці дві системи відповідно: склад X та склад Y.

Склад X видає запасні частини з 6⁰⁰ г. по 17⁰⁰ г., склад Y - з 13⁰⁰ г. по 24⁰⁰ г., як показано на рисунку 1.

Приймаємо коефіцієнт готовності кожного зі складів $\kappa_r = 0,95$. Імовірність виконання заказу на постачання необхідного заказу складає 0,85 для кожного складу.

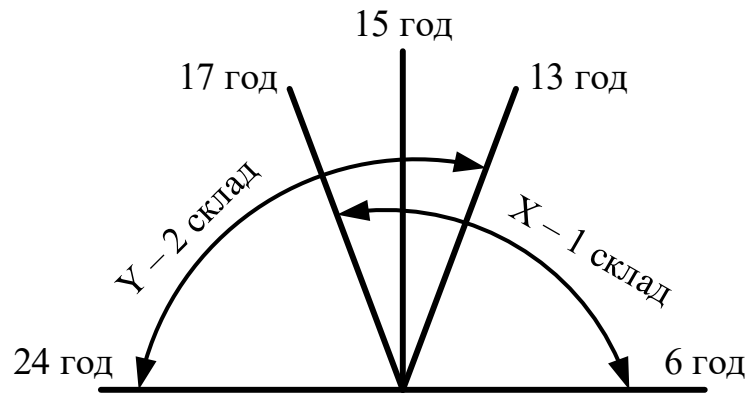


Рисунок 1 - Розподіл часу роботи складів.

Авторська розробка

За цих умов потрібно знайти імовірність виконання замовлень локомотивних депо відповідно графіку роботи складів.

Визначимо імовірність виконання замовлення при одночасній роботі двох складів, тобто вважаємо, що вони працюють паралельно

$$P = 1 - (1 - p)^2 = 0,978$$

Нехай, система, що складаються з двох діючих складів, знаходиться у стані A_0 . Імовірність того, що система в деякий час знаходяться в цьому стані, дорівнює $h_0 = K_r^2 = 0,95^2 = 0,9025$

Відмітимо, що з 13⁰⁰ до 17⁰⁰ в системі постачання знаходяться обидва склади, а з 6⁰⁰ до 13⁰⁰ – склад X, а з 17⁰⁰ до 20⁰⁰ – склад Y, тобто на протязі 14 годин працює один склад, а на протязом 4 години – два склади.

Умовний показник ефективності стану A_0 визначаємо, як середньозважене значення, що дорівнює

$$F_0 = \frac{4}{18} \cdot 0,978 + \frac{14}{18} \cdot 0,85 = 0,878$$

Тоді ефективність системи складає

$$E_0 = h_0 F_0 = 0,9025 \cdot 0,878 = 0,793$$

Розглянемо стан S_x – працює склад X, а склад Y не працює. В цьому випадку $h_x = K_r(1 - K_r) = 0,0475$. В період з 6⁰⁰ до 17⁰⁰ працює один склад, а з 17⁰⁰ до 24⁰⁰ жодного.

$$F_0 = \frac{11}{18} \cdot 0,85 + \frac{7}{18} \cdot 0 = 0,519$$

Тоді

$$E_x = h_x F_x = 0,0475 \cdot 0,519 = 0,0247$$

Стан S_y аналогічний в нашому випадку стану S_x , тобто

$$E_y = h_y F_y = 0,0475 \cdot 0,519 = 0,0247$$

Таким чином, ефективність системи, що сформована з двох складів, дорівнює

$$E = E_0 + E_x + E_y = 0,743 + 2 \cdot 0,0247 = 0,842$$

Слід відмітити, що підвищити ефективність цієї складської системи можна, як за рахунок збільшення часу одночасної роботи складів, так і за рахунок збільшення імовірності виконання замовлення на постачання продукції.



Далі оцінюємо ефективність системи довгострокової дії.

Для цього наведемо приклад процедури оцінки ефективності системи довгострокової дії. Система організації діагностування на стаціонарних пунктах (ПКД) локомотивів представляє саме таку систему, оскільки виконує заходи з діагностування за весь період експлуатації локомотивів.

Нехай організація діагностування в локомотивному депо проводиться на двох рівноцінних ділянках. Назвемо їх відповідно 1 і 2.

В разі роботи двох ділянок пропускна спроможність системи організації діагностування можна оцінити деякою величиною N . Коли одна з ділянок не функціонує, пропускна спроможність системи організації діагностування зменшується до величини $M=0,4 N$. Коли обидві ділянки ПКД не функціонують будемо вважати, що перед ТО, ПР діагностування припиняється. Припустимо, що імовірність безвідмовної роботи кожної ділянки розподіляється за експоненціальним законом з імовірністю відмов λ , тобто $P(t) = e^{-\lambda t}$. Відмова ділянок ПКД прийняті незалежними.

Умовні показники ефективності для різних реалізацій процесів переходу роботи ПКД з одного стану в інший приймаємо наступними (рисунок 2)

$$F_0 = Nt$$

$$F_i = Nx_i - M(x_i - t) = Mt + (N - M)x_i$$

Аналогічно

$$F_{ij}(x_i; x_j) = Mx_i + (N - M)x_j \quad (x_j > x_i; i, j = 1, 2)$$

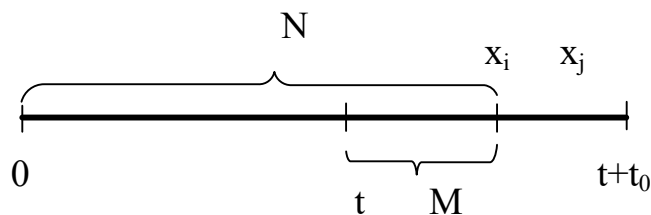


Рисунок 2 - Умовні показники ефективності роботи системи за час функціонування

Авторська розробка

Це можна трактувати як продуктивність роботи системи в різних станах за час її функціонування.

Таким чином, в розгорнутому вигляді оцінку ефективності системи визначимо за формулою (2).

Спочатку визначимо h_0 для розглянутих станів системи.

$$h_0 = \prod_{i=1}^2 r_i = r \cdot r = r^2$$

$$h_i^* = \frac{h_0}{r_i(t_1 + t_0)} = \frac{r^2}{r} = r; \quad \sum h_i^* = r + r = 2r$$

$$h_{ij}^* = \frac{h_0}{r_i \cdot r_j} = \frac{r^2}{r} = 1; \quad \sum h_i^* = 1 + 1 = 2$$

З урахуванням цього оцінка ефективності системи приймає вигляд



$$E = E_0 + E_1 + E_2,$$

де $E_0 = r^2 Nt$

$$E_1 = 2r \int_0^t [Mt + (N - M)x] \lambda e^{-\lambda x} dx$$

$$E_2 = 2 \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx \int_0^x [Mt + (N - M)y] \lambda e^{-\lambda y} dy$$

Проаналізуємо два вирази, застосовуючи інтегрування по частинах

$$E_1 = 2r \int_0^t [Mt + (N - M)x] \lambda e^{-\lambda x} dx = 2r \left\{ \int_0^t Mt \lambda e^{-\lambda x} dx + \int_0^t (N - M)x \lambda e^{-\lambda x} dx \right\} =$$

$$= 2r \left\{ Mt \lambda \left(-\frac{1}{\lambda} \right) (e^{-\lambda t} - 1) + (N - M) \lambda \left[-\frac{te^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} [e^{-\lambda t} - 1] \right] \right\} =$$

$$= 2r \left\{ Mt (1 - e^{-\lambda t}) + (N - M) \lambda \left(\frac{\lambda te^{-\lambda t} - e^{-\lambda t} + 1}{\lambda^2} \right) \right\} =$$

$$= 2r \left\{ Mtq + \frac{(N - M)}{\lambda} (\lambda te^{-\lambda t} - e^{-\lambda t} + 1) \right\}$$

$$E_2 = 2 \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx \int_0^x (Mq + (N - M)y) \lambda e^{-\lambda y} dy =$$

$$= 2 \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx (Mq + \frac{(N - M)}{\lambda} y) (1 - \lambda e^{-\lambda x} (1 + \lambda x)) =$$

$$= 2 \left\{ \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} M (1 - e^{-\lambda x}) dx + \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} \frac{(N - M)}{\lambda} (1 - e^{-\lambda x} (1 + \lambda x)) dx \right\}$$

Проведено спрощення двох останніх виразів

$$I_1 = \int_0^t \lambda M e^{-\lambda x} dx - \int_0^t \lambda M e^{-2\lambda x} dx = \lambda M \int_0^t x e^{-\lambda x} dx - \lambda M \int_0^t x e^{-2\lambda x} dx =$$

$$= \lambda M \left(-\frac{te^{-\lambda t}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} (e^{-\lambda t} - 1) \right) - \lambda M \left(-\frac{te^{-2\lambda t}}{2\lambda} - \frac{1}{4\lambda^2} (e^{-2\lambda t} - 1) \right) =$$

$$= \lambda M \left(\frac{-\lambda te^{-\lambda t} - e^{-\lambda t} + 1}{\lambda^2} \right) - \left(\frac{-2\lambda te^{-2\lambda t} - e^{-2\lambda t} + 1}{4\lambda^2} \right) =$$

$$= \frac{\lambda M}{\lambda^2} \left(-\lambda te^{-\lambda t} - e^{-\lambda t} + 1 - \left(\frac{-2\lambda te^{-2\lambda t} - e^{-2\lambda t} + 1}{4} \right) \right) =$$

$$= \frac{M}{\lambda} \left(1 + r(1 + \lambda t) - \left(\frac{1 - r^2(1 + 2\lambda t)}{4} \right) \right) =$$

$$= \frac{M}{\lambda} \left(\frac{3}{4} + r(1 + \lambda t) + \frac{1}{4} r^2(1 + 2\lambda t) \right)$$



$$\begin{aligned}
 I_2 &= (N - M) \left(\int_0^t e^{-\lambda x} dx - \int_0^t e^{-2\lambda x} dx - \int_0^t e^{-\lambda x} \lambda x dx \right) = \\
 &= (N - M) \left(\left(-\frac{1}{\lambda} \right) (e^{-\lambda t} - 1) - \left(-\frac{1}{2\lambda} \right) (e^{-2\lambda t} - 1) - \left(\left(\frac{te^{-2\lambda t}}{2\lambda} \right) - \left(-\frac{1}{(2\lambda)^2} \right) (e^{-2\lambda t} - 1) \right) \right) = \\
 &= (N - M) \left(-\frac{e^{-\lambda t}}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} + \frac{e^{-2\lambda t}}{2\lambda} - \frac{1}{2\lambda} + \frac{\lambda e^{-2\lambda t}}{2\lambda} + \frac{\lambda e^{-2\lambda t}}{4\lambda^2} - \frac{\lambda}{4\lambda^2} \right) = \\
 &= \frac{(N - M)}{\lambda} \left(-e^{-\lambda t} + 1 + e^{-2\lambda t} - \frac{1}{2} + \frac{\lambda e^{-2\lambda t}}{2} + \frac{e^{-2\lambda t}}{4} - \frac{1}{4} \right) = \\
 &= \frac{(N - M)}{\lambda} \left(\frac{1}{4} - r + \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \lambda t \right) r^2 \right)
 \end{aligned}$$

Остаточню умовний показник ефективності організації діагностування локомотивів на двох стаціонарних пунктах має такий вигляд

$$\begin{aligned}
 E &= r^2 N t + 2r \left\{ M t q + \frac{(N - M)}{\lambda} [1 - r(1 + \lambda t)] \right\} + \\
 &+ \left\{ \frac{M}{\lambda} \left[\frac{3}{4} - r(1 + \lambda t) + \frac{1}{4} r^2 (1 + 2\lambda t) \right] + \frac{(N - M)}{\lambda} \left[\frac{1}{4} - r + \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \lambda t \right) r^2 \right] \right\}
 \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned}
 E &= r^2 N t + 2r \left\{ 0,4 N t q + \frac{0,6 N}{\lambda} [1 - r(1 + \lambda t)] \right\} + \\
 &+ 2 \left\{ \frac{0,4 N}{\lambda} \left[\frac{3}{4} - r(1 + \lambda t) + \frac{1}{4} r^2 (1 + 2\lambda t) \right] + \frac{0,6 N}{\lambda} \left[\frac{1}{4} - r + \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \lambda t \right) r^2 \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Промодельюємо цей вираз для значень $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-1}$, $\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-2}$, $\lambda_3 = 1 \cdot 10^{-3}$ при $N = [5, 10, 15]$ за час роботи t від 6 до 24 годин і представимо цю залежність графічно за даними табл. 1

Таблиця 1 - Залежність $E = f(\lambda, N, t)$

Показник $\lambda[x]$	$N_1=5$				$N_2=10$				$N_3=15$			
	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24
$\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-1}$	21,6	32,5	38,3	41,2	43,1	65	76,5	82,7	64,6	97,5	114,8	123,9
$\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-2}$	28,9	55,9	81	104,4	57,9	111,8	162	208,8	86,8	167,7	249	313
$\lambda_3 = 1 \cdot 10^{-3}$	29,9	59,6	89	118,3	59,8	119,1	178,1	236,6	89,1	178,7	267,1	364,9

Авторська розробка

Ці графічні залежності представлені на рисунку 3

Наведені графічні залежності дозволяють оцінювати ефективність функціонування системи діагностування локомотивів для досягнення можливості її регулювання як за рахунок пропускнуої спроможності N , так і за рахунок зменшення інтенсивності відмов, тобто підвищення її надійності.

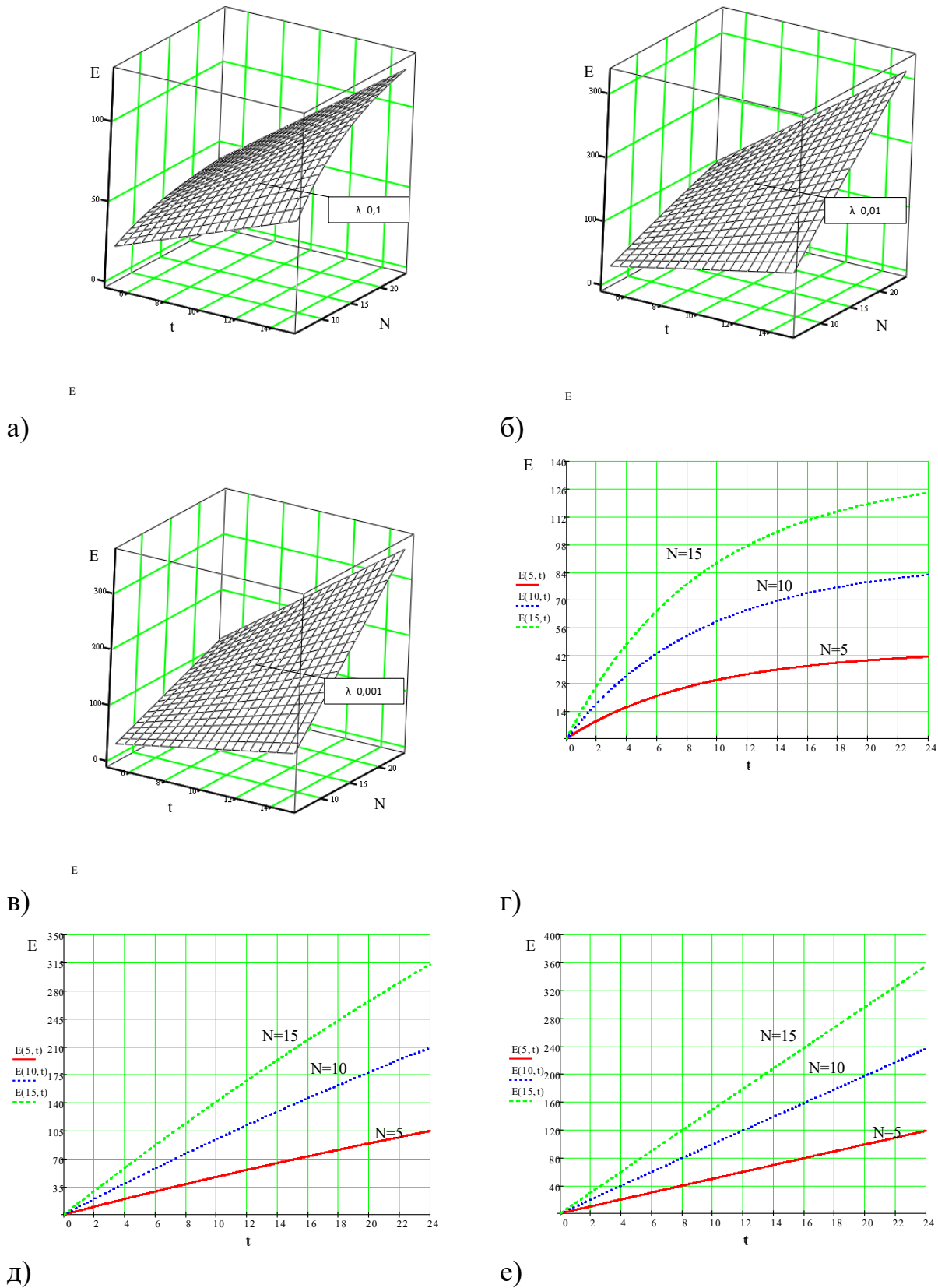


Рисунок 3. - Динаміка зміни ефективності системи довготривалої дії для відповідно $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-1}$, $\lambda_2 = 1 \cdot 10^{-2}$, $\lambda_3 = 1 \cdot 10^{-3}$

Авторська розробка



Висновки.

Ефективність інфраструктурних складових системи утримання і, зокрема, підрозділів залізниць повинна враховувати тип системи, яка може бути як довгостроковою так і короткочасної дії.

Для системи короткочасної дії підвищення її функціональності можливе, як за рахунок збільшення часу одночасного функціонування її складових чи загального часу їх окремої роботи, так і за рахунок збільшення імовірності виконання заказів (наявності на складах необхідний запасів за заявкою)

Для систем довготривалої дії підвищення ефективності їх функціонування залежить від пропускної спроможності підсистем, часу їх роботи, як окремо, так і разом. При цьому при суттєвому поліпшенні надійності роботи самої системи (зменшення λ) її ефективність залишається майже незмінною (таблиця 3)

Литература:

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010 – 2019 роки (затверджена Постановою КМУ від 16.12.2000 р. № 1390 зі змінами від 26.01.2011 р. № 1106);

2. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки. – Киев, Укрзалізниця, 2008. – 182 с.

3. Лашко А.Д. Основные направления обновления тягового подвижного состава Украины в 2006-2010 гг. / А.Д. Лашко, В.Н. Самсонкин, А.М. Гончаров, А.В. Коновалов // Локомотив-информ. – 2006. - №6. – С.8-12.

4. Krashenin O., Klymenko O., Ponomarenko O., Yakovlev S. (2018) Justification of statutory service life extension of locomotives on the basis of theory of aging. International Journal of Engineering & Technology. № 7 (43). P. 174-178.

5. Alexander Krashenin, Olga Shapatina, Vitali Ponomarenko/ Estimation of vehicle operating time taking into account the influence a member of factors. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології», 2021. Вип..37, С. 76-85.

6. Крашенінін О.С., Яковлев С.С., Шапатіна О.О. Вплив організації технічного обслуговування на ефективність експлуатації тягового рухомого складу. Транспортні системи і технології. Київ: ДУІТ, 2018 № 32. С. 103-114.

7. Крашенінін О.С., Клименко О.В., Яковлев С.С., Шапатіна О.О. Обґрунтування маневреності ремонтного господарства локомотивного депо. Збірник наукових праць УкрДУЗТ: Харків, 2018. № 181. С. 15-23.

8. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио», 1972. – 552 с.

9. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог [Текст] : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин [и др.]. – Луганск : Изд-во «Ноулидж», 2011. – 174 с.

Abstract. Traditional approaches to assessing the effectiveness of the infrastructure of railway units do not fully take into account the types of systems that make up this infrastructure. This is that systems (locomotives, cars, machines, buildings, subdivisions of the locomotive industry) can be long-term or short-term.



Accordingly, the article considers issues related to the evaluation of the efficiency of railway transport infrastructure and, in particular, the locomotive industry.

To do this, factors are introduced (probabilities of system states, conditional indicator of system efficiency), as the total result of system efficiency during the change of system states.

Key words: *conditional indicator of system efficiency, probability of system state, failure rate*

Стаття відправлена: 25.05.2022 г.

© Крашенінін О.С.