

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор
(НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-
Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрійчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ,
м. Чернігів)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ХНТУСГ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.
(VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська
політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н. професор (НУ «Львівська
політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Гриньов В. Б., Виноградов В. В.* Алгоритм управління спектром власних частот і форм коливань за рахунок зміни геометричних параметрів щоглових систем 6
- Каплін Р. Б.* Розрахунок надійності сталезалізобетонних прогонових будов 17
- Хаммуд М. Т., Пчолкін Р. М.* Експериментальне дослідження коротких сталобетонних колон на статичні впливи 24

Теплоенергетика (144)

- Білошицький Е. В., Ловська А. О., Мямлін С. С.* Зниження непродуктивних витрат тепла пасажирського рухомого складу в опалювальний період 34

Транспортні технології (275)

- Кіріцева О. В., Клецька О. В., Лямзін А. О., Фалендиш А. П.* Спрощений підхід до визначення об'єкта металургійного комбінату для розробки заходів із підвищення ефективності роботи залізничного транспорту 41

Залізничний транспорт (273)

- Буреш Ф.* Математическая модель пространственных колебаний железнодорожного четырехосного автономного тягового модуля 52
- Kostyria I. I., Liubenko P. I., Artemenko O. V., Aulin D. O.* Improving the Diesel Fuel Quality for Tractional Rolling Stock Diesel Engines 65

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Фідровська Н. М., Пономаренко Р. В., Слепужніков Є. Д., Козодой Д. С.* Обґрунтування проведення тарировки тензорезисторів у комплексі з вимірювальним обладнанням 72
- Агеев М. С., Грицук І. В., Солових Е. К.* Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту 81

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.014

**АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ СПЕКТРОМ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ І ФОРМ КОЛИВАНЬ
ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЩОГЛОВИХ СИСТЕМ**

Д-р техн. наук В. Б. Гриньов, асист. В. В. Виноградов

**ALGORITHM FOR CONTROLLING THE SPECTRUM OF EIGENFREQUENCIES AND
VIBRATION MODES BY CHANGING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF MAST
SYSTEMS**

D. Sc. (Tech.) V. B. Grinyov, assistant V. V. Vynogradov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230025>

***Анотація.** У статті розглядається модель щогли з шістьма рівнями закріплення вант. Головну увагу в роботі приділено розгляду методів управління спектром власних частот. Автоматизація процесів обчислення забезпечується за рахунок програмування вбудованого модуля в програмі Revit. У роботі проведено аналіз чутливості для першої та другої власних частот. Наведено співвідношення на випадок завдання пошуку екстремуму власної частоти з заданим номером за умови, що загальний обсяг варійованих поясів фіксований.*

***Ключові слова:** щогли з вантовим закріпленням, управління спектром власних коливань, розподіл геометричних характеристик, варійовані величини.*

***Abstract.** The article considers a model of a mast with six levels of fastening of cables. The main attention in the work is considered to the methods of control of the natural frequency spectrum, due to the use of methods of sensitivity analysis and optimization. The above task is achieved by varying the cross-sectional area of the pipes - racks. Automation of computational processes is provided by programming the built-in module in the Revit program. For more convenient and faster control of the natural frequency spectrum, the algorithm described above was written in a free add-on for Revit - Dynamo. With the help of so-called nodes, an application was created that took data from the depicted 3D model Revit and performed calculations. This allows you to easily use optimality conditions similar to the maximum principle.*

The sensitivity analysis for the first and second own is carried out in the work. The mechanism of their management within the limits of the investigated model is shown. The relations in the case of the problem of finding the natural frequency extremum with a given number are given, provided that the total amount of varied bands is fixed.

The numerical control algorithm is based on the necessary optimality conditions in the form of the maximum principle for rod models. A variant of varying the area of the belts along the height of the mast is proposed. The sensitivity analysis for the first and second natural frequencies is carried out and its use for construction of effective computational process is shown. Based on the results of the work, a working software algorithm was created for fast analysis of mast oscillations on extensions. Graphs of zones of possible change of the first and second frequencies are resulted. The distribution of the cross-sectional area for frequencies is shown. To compare the results of natural frequency calculations on other calculation models, the first and second natural frequencies of bending oscillations were calculated by the finite element method in the SCAD complex. The errors

for the points of the curves (constant in the height of the mast area of the belts) do not exceed 10%. It should be noted that the consideration of optimization problems of the above type on the basis of finite element models is quite difficult; for them it is not possible to formulate the necessary conditions of optimality similar to the principle of maximum.

Keywords: masts with cable fastening, control of the spectrum of natural oscillations, distribution of geometrical characteristics, variable values.

Вступ. Можливість управління спектром власних коливань металевих конструкцій на відтяжках, особливо значної висоти або габаритів, завжди викликала значну зацікавленість. Щогли мобільного зв'язку є особливим відносно новим типом висотних споруд. У технічній літературі недостатньо рекомендацій, адресованих проектувальникам щогл мобільного зв'язку, відсутні обов'язкові нормативні документи з їх проектування. При проектуванні і експлуатації щогл мобільного зв'язку відбувається високий рівень перевитрати матеріалу і висока пошкоджуваність конструкції. Дані обставини обумовлюють необхідність удосконалення методів розрахунку, діагностики та розвитку ефективного перерозподілу обсягу матеріалу та можливість таким чином управляти спектром власних коливань. Також з настанням епохи 5G, яка так стрімко розповсюджується Європою, все більше щогл потребують перерахунку в результаті збільшення навантаження. З огляду на їх функціональність до щогл мобільного зв'язку виставляють вимоги необхідної несучої здатності, жорсткості, стійкості, надійності і довговічності з урахуванням забезпечення мінімальної маси, а також технологічності виготовлення і монтажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оптимізації стрижнів за спектром власних частот розглянуто в роботах вітчизняних вчених, таких як Гриньов В. Б., Філіппов А. П., Понтрягін Л. С., Болтянський В. Г., Гамкрелідзе Р. В., Міщенко Е. Ф. та ін. У цілому питання оптимізації та аналізу чутливості знайшли відображення у працях багатьох закордонних науковців, зокрема Хог Е., Чой К., Комкова В.

Зауважимо, що використання підходів, описаних в [3, 9], для щогл на відтяжках мобільного зв'язку описується вперше. На нашу думку, в умовах швидкого збільшення кількості даних конструкцій треба більше уваги приділяти питанню збалансованості використання матеріалу. На сьогодні саме таке завдання є актуальним у світі мобільних вишок, адже збільшення обладнання та часта його заміна стимулюють постійний аналіз таких систем. Саме використання сучасних ВІМ-моделей щогл та програмування їх швидкого аналізу та розрахунку є важливим завданням сучасного інженерного світу.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – на прикладі щогли з шістьма рівнями відтяжок проаналізувати проблеми управління спектром власних частот. Запропонувати варіант варіювання площею поясів за висотою щогли. Провести аналіз чутливості для першої і другої власних частот і показати його використання для побудови ефективного обчислювального процесу. Показати можливості поширення розробленого підходу на більш загальні завдання управління спектром та створити модель для швидкого аналізу та управління.

Об'єкт дослідження – шістдесяти-метрова щогла на відтяжках при розгляді можливості управління спектром власних коливань.

Предмет дослідження – процеси управління спектром власних коливань щогл мобільного зв'язку.

Основна частина дослідження. Всі побудови в роботі проводяться на прикладі щогли мобільного зв'язку висотою $l = 60\text{ м}$ з шістьма рівнями вантових відтяжок, схема якої зображена на рис. 1.

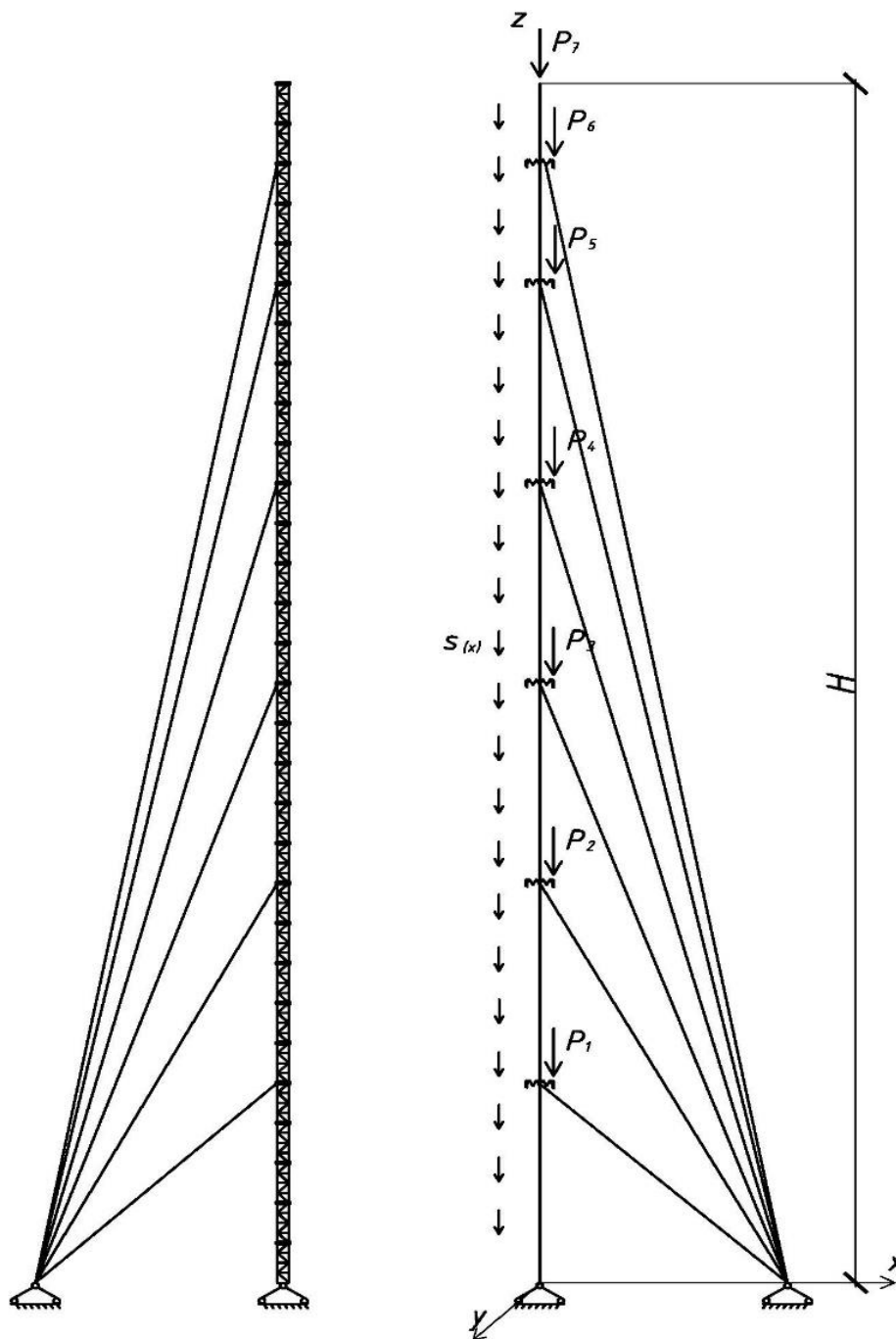


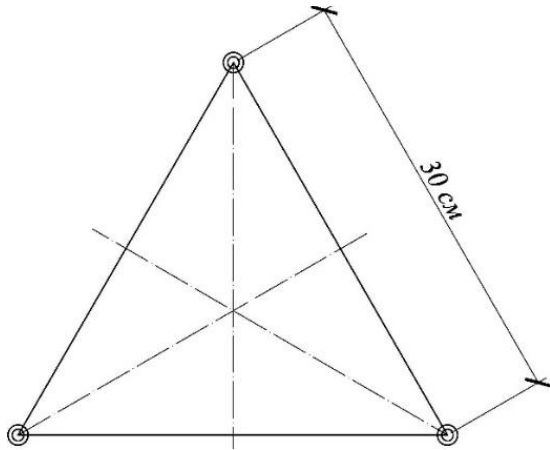
Рис. 1. Загальний вигляд розрахункової схеми щогли (стрижнева модель):
 P_1 – P_7 – осьові зосереджені сили, що реалізують вплив на щоглу вант і ваги обладнання;
 $s(x)$ – поздовжнє навантаження, що визначається власною вагою щогли

Щогла складена з двометрових секцій тригранного поперечного перерізу (рис. 2).

На рис. 3 показано обладнання, яке навішується на щоглу. Між собою секції з'єднуються фланцями. Пояси подано трубчастими елементами, що мають

фіксовані внутрішній і зовнішній діаметри в межах однієї секції. Будемо вважати, що від секції до секції зовнішній діаметр залишається постійним, а внутрішній може змінюватися відповідно до даних, наведених в таблиці.

а



б

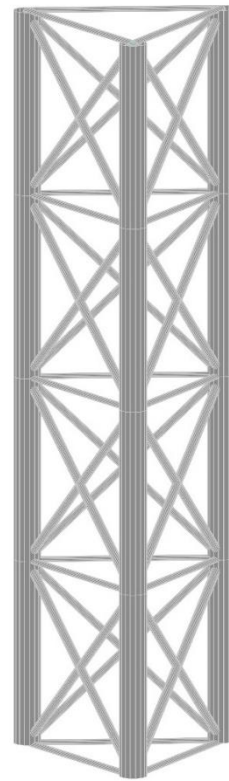


Рис. 2. Загальний вигляд секцій (б) і схема поперечного перерізу (а)

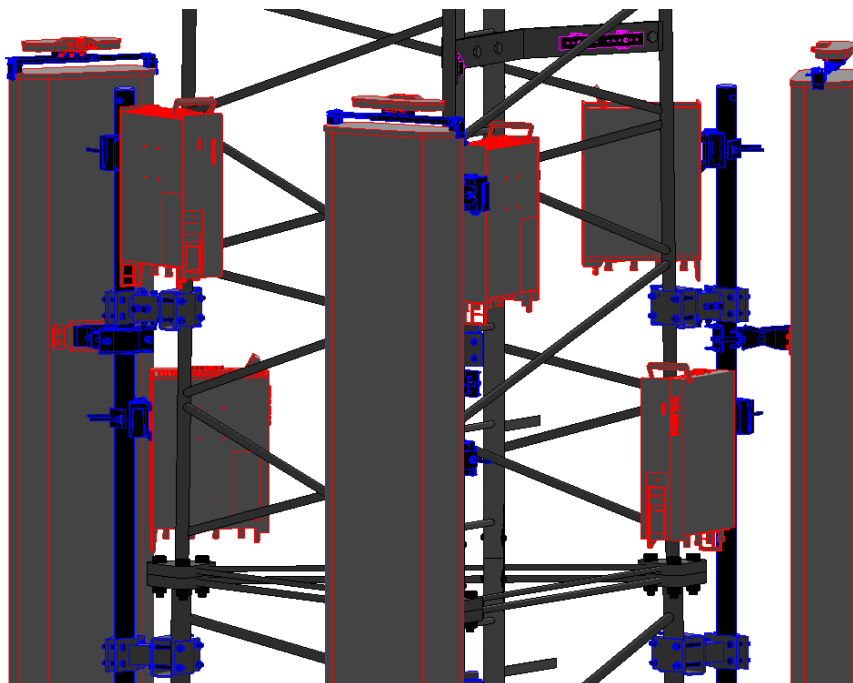


Рис. 3. Обладнання, що монтується на щоглах

Набір можливих варіантів перерізів поясів

Номер за сортаментом	1	2	3	4	5	6	7
Параметри труби, діаметр x товщина, см	4.8x0.2	4.8x0.22	4.8x0.25	4.8x0.28	4.8x0.3	4.8x0.32	4.8x0.35
$F, \text{см}^2$	8.670	9.496	10.721	11.928	12.723	13.511	14.679
$I_z, \text{см}^4$	1325.6	1452.5	1638.3	1822.4	1943.7	2063.8	2241.7

Далі будемо вважати, що варійованою вважається функція, яка визначає розподіл сумарної площі поясів за висотою щогли $F(z)$. При цьому дискретний характер варіювання замінимо на певному етапі на безперервний; тобто вважатимемо, що варіюється безперервна $F(z)$, яка підлягає обмеженням

$$F_1 \leq F(z) \leq F_2, \quad (1)$$

де F_1, F_2 відповідають сортаменту 1 і 7 в таблиці.

Решітка для секції, показаної на рис. 2, складається з круглих прутів діаметром $\varnothing 1.4$ см. При цьому решітка для різних секцій залишається тією самою.

Момент інерції поперечного перерізу при згині в площині zx буде позначатися $I(z)$, при цьому момент інерції буде функцією площі в рамках обмежень (1). З геометрії перетину (рис. 2) можна припустити $I = \alpha F$. З таблиці видно, що можна прийняти $\alpha = 152.9$.

Модуль пружності $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$, питома вага $\gamma = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$, щільність матеріалу $\mu = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{см}^2$ однакова для поясів і решітки. Відтяжки (ванти) являють собою канат одинарної завивки типу Т діаметром $\varnothing 1.4$ см за стандартом ГОСТ 3063-80. Зусилля попереднього натягу канатів однакове для всіх рівнів і становить 200 кг.

Крайова задача для власних форм згинальних коливань може бути записана у формі [2, 12].

Для поздовжнього деформування мають місце диференціальні рівняння

$$\frac{dw}{dx} = \frac{N}{EF}; \quad \frac{dN}{dx} = -s \quad (2)$$

з граничними умовами

$$w(0) = 0 \quad N(l) = P_7 \quad (3)$$

і умовами в точках прикладання поздовжніх зосереджених сил P_i , породжених натягом вант,

$$w(z_i^-) = w(z_i^+); \quad N(z_i^-) + P_i = N(z_i^+); \quad i = \overline{1,6}. \quad (4)$$

У цих виразах z_i^- , z_i^+ – значення координати знизу і зверху від точки z_i , функції $w(z)$, $N(z)$ являють собою переміщення і осьові сили. Розподілене осьове навантаження має вигляд

$$S(x) = -\gamma(F + F_d). \quad (5)$$

Величина F_d виходить шляхом ділення сумарного обсягу решітки на довжину секції. У нашому випадку $F_d = 8.3 \text{ см}^2$. Деформації згину щогли можуть бути описані системою диференціальних рівнянь

$$\frac{du}{dz} = \varphi; \quad \frac{d\varphi}{dz} = -\frac{M}{EI}; \quad \frac{dM}{dz} = Q - N\varphi; \quad \frac{dQ}{dz} = -p^2 \mu(F + F_d)u; \quad (6)$$

з граничними умовами

$$u(0) = M(0) = 0; \quad M(H) = 0; \quad Q(H) = -p^2 m_H u(l), \quad (7)$$

і умовами в точках кріплення відтяжок

$$u(z_i^-) = u(z_i^+); \quad \varphi(z_i^-) = \varphi(z_i^+); \quad M(z_i^-) = M(z_i^+); \quad Q(z_i^-) + c_i u(z) = Q(z_i^+); \quad i = \overline{1,6}. \quad (8)$$

В умовах (7) величина m_H являє собою масу обладнання на верхньому майданчику щогли, p – власна частота. Жорсткості C_i (монтажні жорсткості) характеризуються параметрами вантового вузла і підраховуються за співвідношеннями, наведеними в роботі [5].

Для будь-якої функції $F(x)$, підпорядкованої обмеженням (1), крайова задача (6), (7), (8), з урахуванням співвідношень (2), (3), (4), визначає спектр власних частот $p_1 < p_2 < p_3 < \dots$ і відповідних власних функцій $u_i(z)$ ($i = 1, 2, 3, \dots$). Нехай форма коливань $u_i(x)$ (а точніше, набір функцій $u_i(z)$, $\varphi(z)$, $M(z)$, $Q(z)$) належить до безлічі власних функцій, що відповідають власній частоті p із заданим номером. Новий серійний номер власної частоти, в разі простих (некратних) частот, присвоюється в процесі їх чисельного знаходження. Поставимо задачу знаходження в рамках обмежень (1) функції $F(x)$, що доставляє в рамках зазначеного вище різноманіття власних форм екстремальне значення власній частоті p , тобто розглянемо задачу мінімізації функціонала

$$J(F) = kp^2 = \min, \quad (9)$$

для $k = +1(-1)$ це відповідає мінімізації (максимізації) власної частоти. Власну частоту можна подати за допомогою формули Релея [3]

$$p^2 = \int_0^{p^+} \frac{M^2}{EI} dz \Big/ \int_0^H \mu(F + F_d) u^2 dz. \quad (10)$$

Необхідні умови оптимальності у формі принципу максимуму [8] для функціонала (9) з урахуванням виразу (10) детально розглянуто в монографії [3].

З огляду на важливу властивість самоспряженості необхідні умови будуть подані крайовим завданням (2)–(4), кривих, замкнених на оптимальному $F(x)$ умовою максимуму гамільтоніана

$$H = k \cdot \left[\frac{M^2}{E\alpha F} + p^2 \mu(F + F_d) u^2 \right]. \quad (11)$$

З огляду на те, що при максимізації гамільтоніана (11) величини M , u розглядаються як параметри, які можна отримати з формули [3],

для $k = -1$

$$F = \begin{cases} F_2, & F_* \geq F_2; \\ F_*, & F_1 \leq F_* \leq F_2; \\ F_1, & F_* \leq F_1; \end{cases} \quad (12)$$

де $F_* = \frac{|M|}{p|u|\sqrt{\alpha\mu E}}$ знаходиться за умови, що

$$H(F) \text{ для } k = -1 \text{ опукла вгору функція } \left(\frac{\partial^2 H}{\partial F^2} \leq 0 \right);$$

для $k = 1$

$$F = \begin{cases} F_1, & H(F_1) \geq H(F_2); \\ F_2, & H(F_1) < H(F_2). \end{cases} \quad (13)$$

Це є наслідком того, що гамільтоніан $H(F)$ – це опукла вниз функція $\left(\frac{\partial^2 H}{\partial F^2} \leq 0\right)$

і оптимальне рішення можна знайти тільки з ділянок границь (1).

Співвідношення (12), (13) замикають вихідну крайову задачу, роблять її нелінійною. Далі буде використаний підхід, викладений в [3, 11], заснований на послідовному наближенні оптимального рішення на послідовності варійованих функцій. Важливу роль при цьому відіграє

аналіз чутливості, змістом якого є знаходження функціональних похідних $\frac{\partial J}{\partial F}$. Використовуючи результати, викладені в [9], можна записати

$$\frac{\partial J}{\partial F} = \frac{\partial H}{\partial F} = k \left[-\frac{M^2}{\alpha E F^2} + p^2 \mu u^2 \right], \quad (14)$$

що визначає функції чутливості для даної задачі. На рис. 4 показані форми коливань і функції чутливості для першої і другої власних частот в разі $F(x) \equiv F_2$. Для функцій $\delta F(z)$, що визначають необхідні зміни площі поперечного перерізу щогли в межах обмежень (1), зміни власної частоти будуть визначатися інтегралом

$$\delta J = k \int_0^l \left(\frac{\partial H}{\partial F} \delta F \right) dz = k \int_0^l \left[-\frac{M^2}{\alpha E F^2} + p^2 \mu u^2 \right] \delta F dz. \quad (15)$$

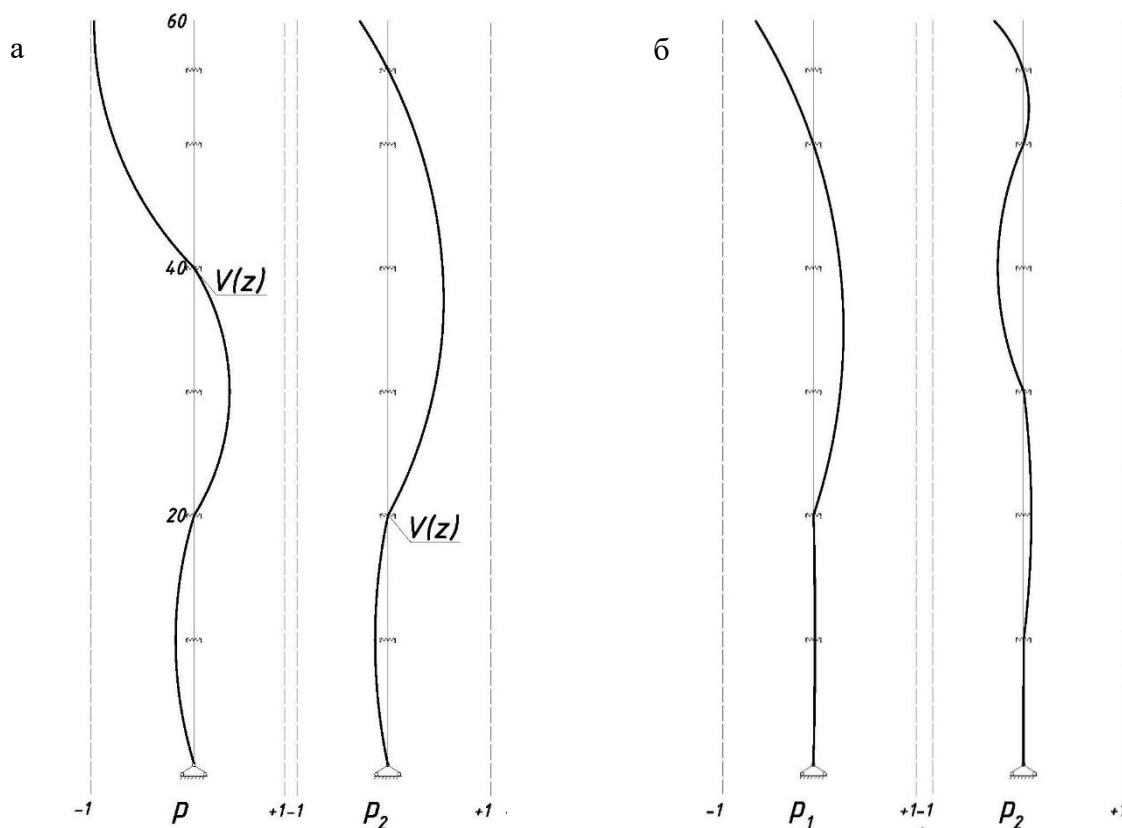


Рис. 4. Форми коливань (а) і функції чутливості (б) для першої p_1 і другої p_2 власних частот

Варіації площі будуть сильніше впливати в тих перетинах, де більша величина похідної, більша чутливість. Зауважимо, що для випадку максимізації власної частоти, згідно з формулою (12), на ділянках оптимального рішення F_* всередині інтервалу $[F_1, F_2]$, похідна (14) перетворюється в нуль. Для інших законів

$F(x)$ вона показує тенденцію зміни частоти.

Розв'язання крайової задачі на власні значення здійснювалося на основі методу початкових параметрів при використанні основних програмних модулів з роботи [2]. Перерахунок законів зміни площі поперечного перерізу $F(z)$ проводився відповідно до залежності

$$F_{i+1}(z) = F_i(z) + k \left[-\frac{M_i^2(z)}{\alpha E F_i^2(z)} + p^i \mu u_i^2(z) \right] \Delta F. \quad (16)$$

При цьому нове наближення $F_{i+1}(z)$ мало би підпорядковуватися обмеженням (1). Якщо в будь-якій точці $F_{i+1}(z) > F_2 (< F_1)$, то приймалося $F_{i+1}(z) = F_2 (= F_1)$. Величина кроку ΔF

була постійна за висотою щогли; зокрема, в проведених розрахунках приймалося $\Delta F = (F_2 - F_1)/3$. На рис. 5 наведено замкнуті криві в координатах об'єм (V) – власні частоти (p) (для другої і першої власних частот).

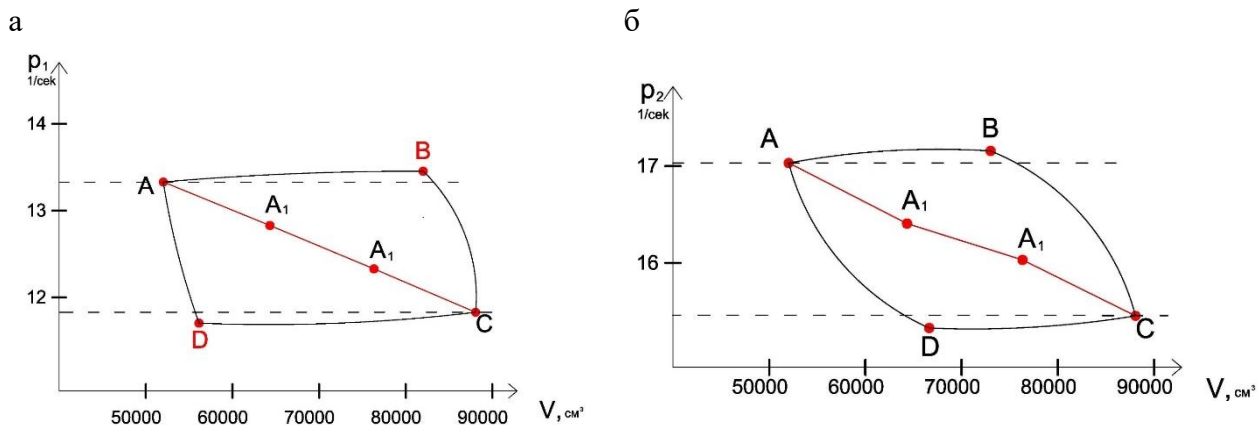


Рис. 5. Зони можливих змін першої (а) і другої (б) власних частот

Криві $AA'C$ відповідають залежностям частот від обсягу для щогл постійного за висотою поперечного перерізу. Характерно, що для мінімальної в рамках обмежень (1) площі поперечного перерізу (точка А) відповідає більша величина частоти, ніж для максимального значення площі (точка С). Оскільки власні частоти визначаються співвідношенням характеристик жорсткості та інерційних характеристик, із зазначеного

співвідношення можна зробити висновок, що зростання площі поперечного перерізу переважно збільшує інерційні характеристики. Ця обставина характерна як для першої, так і для другої власних частот.

На рис. 6 наведено розподіли $F(x)$, відповідні частотам p_1^+, p_1^- і p_2^+, p_2^- . Жирною пунктирною лінією показана частинна апроксимація оптимального рішення відповідно до дискретної схеми варіювання, наведеної в таблиці. Для

конкретного z значення площі в межах секції приймається рівним до найбільш близького з дискретних наборів, зазначених

в таблиці. Така дискретизація оптимальних розподілів $F(x)$ практично не впливає на величини власних частот.

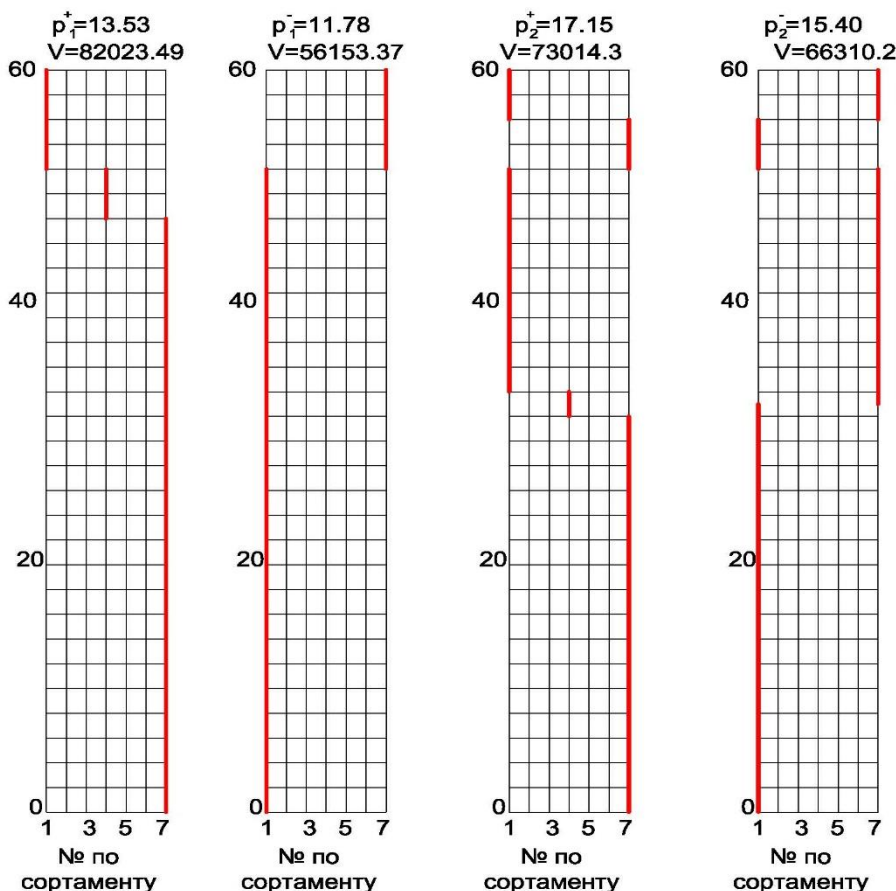


Рис. 6. Розподіл площі перетину для частот p_1^+, p_1^- і p_2^+, p_2^-

Наведені співвідношення узагальнюються на випадок завдання пошуку екстремуму власної частоти з заданим номером за умови, що загальний обсяг варійованих поясів фіксований,

$$V = \int_0^l F(x) dz = const. \quad (17)$$

Для такого завдання функціонал якості (9) модернізується

$$J(F) = kp^2 + k_0 \int_0^l F dz, \quad (18)$$

де k_0 – невизначений множник Лагранжа для обліку умови сталості обсягу (17). Гамільтоніан в цьому випадку набуває вигляду

$$H = k \left[\frac{M^2}{E\alpha F} + p^2 \mu(F + F_d) u^2 \right] + k_0 F. \quad (19)$$

Для заданої задачі оптимізації функція чутливості позначається так, як це запропоновано в [3], через $V \rightarrow p$. Функція чутливості матиме вигляд

$$\frac{\partial J}{\partial F} = k \left[-\frac{M^2}{\alpha E F^2} + p^2 \mu \omega^2 \right] + k_0. \quad (20)$$

Аналогічні побудови мають місце і для двоїстої задачі, що позначається $V \rightarrow p$ відповідно до [3,10] як завдання знаходження $F(x)$, що надає в рамках обмежень (1) екстремального значення обсягу матеріалу при фіксованому значенні відповідної власної частоти. Рішення даних завдань утворюють в координатах V, p замкнуту криву; приклади таких кривих для

першої і другої власних частот згинальних коливань показано на рис. 5. Для будь-якого фіксованого обсягу $V \in [V_1, V_2]$ верхні ділянки ABC відповідають, в рамках завдання $V \rightarrow p$, максимальним, а нижні ADC – мінімальним власним частотам. Для фіксованого значення частоти $p \in [p^-_1, p^+_2]$ ліві ділянки DAB відповідають мінімальним, а праві BCD – максимальним величинам обсягів.

Точки зазначених замкнутих кривих будувалися шляхом вирішення завдань $V \rightarrow p$ на основі формул, аналогічних (16):

$$F_{i+1}(z) = F_i(z) + \left[k \left[-\frac{M_i^2(z)}{\alpha E F_i^2(z)} + (p^i)^2 \mu \omega_i^2(z) \right] + k_0 \right] \Delta F, \quad (21)$$

де величини k_0, k нормовані $|k| \leq 1, |k_0| \leq 1$. Це досягається на кожному кроці шляхом їх поділу на $\max(|k|, |k_0|)$. Питання виконання умов (17) на кожному кроці вирішується підбором величини k_0 в (21). Слід зауважити, що для завдання $p \rightarrow V$ така проблема важко вирішувана.

У процесі нормування величина k в (21) змінюється і дає змогу побудувати необхідні наближення до оптимального рішення.

Як видно з характеру замкнутої кривої, на ділянці АВ для частоти p_1 величина максимальної частоти мало залежить від величини обсягу. Такою ж властивістю володіє мінімальна частота для ділянки DC. Це існує внаслідок своєрідного співвідношення характеристик жорсткості та інерційних характеристик для даного варіанта конструкції.

Замкнені криві ABCD визначають резерви даної конструкції з точки зору можливих змін першої і другої власних частот згинальних коливань і обсягу (ваги) матеріалу поясів.

Для порівняння результатів розрахунків власних частот за іншими

розрахунковими моделями перша і друга власні частоти згинальних коливань розраховувалися методом скінченних елементів у комплексі SCAD. При побудові розрахункової моделі використовували схему, показану на рис. 2. Похибки для точок кривих Aa1 A2C (постійної за висотою щогли площі поясів) не перевищують 10%. Слід зауважити, що розглядати завдання оптимізації зазначеного вище типу на основі скінченно-елементних моделей досить важко; для них не вдається сформулювати необхідні умови оптимальності, аналогічні принципу максимуму [8]. Оптимізація на дискретному наборі варійованих величин можлива, але тягне за собою значні обчислювальні труднощі.

Для більш зручного та швидкого управління спектром власних частот вищеописаний алгоритм було записано в безкоштовному доповненні для програми Revit – Dynamo. За допомогою так званих нодів було створено аплікацію, яка брала дані з зображеної 3D моделі Revit та проводила розрахунки. На рис. 7 подано так званий Dynamo Script для розглянутої задачі.

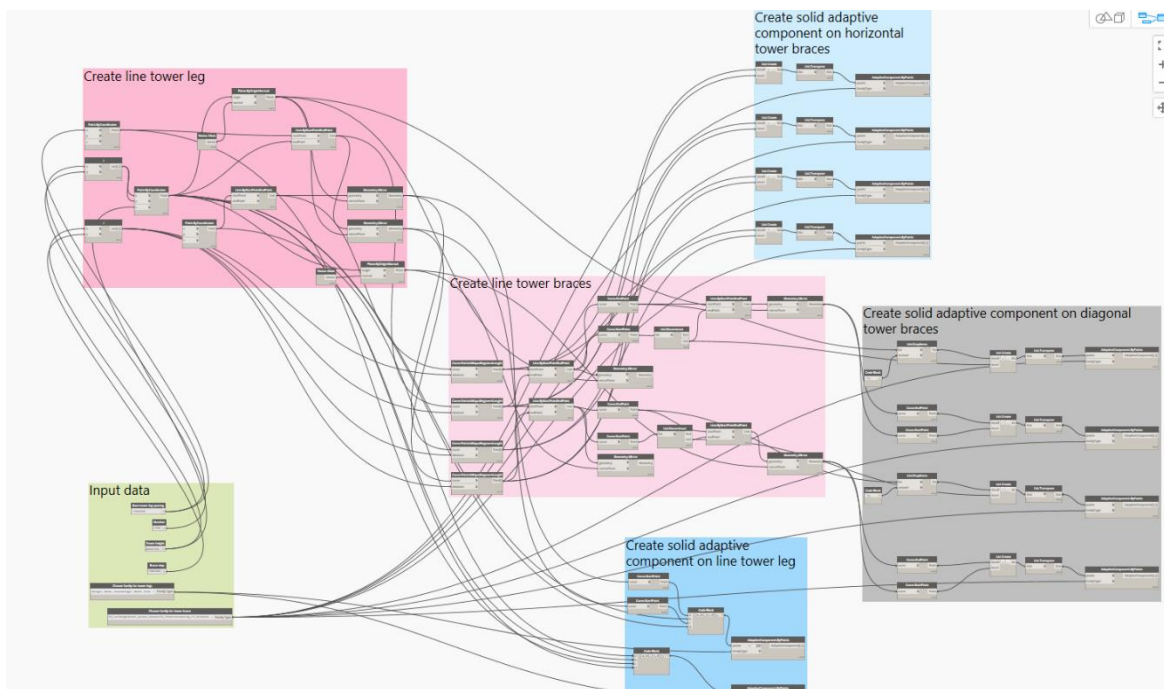


Рис. 7. Dynamo Script для управління власними частотами

Висновки. У роботі запропоновано підхід до проблеми управління спектром власних частот згинальних коливань щогл на відтяжках. Чисельний алгоритм управління базується на необхідних умовах оптимальності у формі принципу максимуму для стрижневих моделей. Запропоновано варіант варіювання площею

поясів за висотою щогли. Проведено аналіз чутливості для першої і другої власних частот і показано його використання для побудови ефективного обчислювального процесу. Показано можливості поширення розробленого підходу на більш загальні завдання управління спектром.

Список використаних джерел

1. Гриньов В. Б. Деякі особливості завдань оптимізації статично навантажених балок. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, 2011. Вип. 62. С.88–96.
2. Гриньов В. Б., Алешечкіна Т. Н. Розрахунок одновимірних елементів конструкцій. Харків: Видавництво Іванченко І. С., 2013. 177 с.
3. Гриньов В. Б., Філіппов А. П. Оптимізація стрижнів по спектру власних частот. Київ: Наукова думка, 1979. 211 с.
4. Про одну модельну задачу оптимізації щогл мобільного зв'язку / В. Б. Гриньов, Ю. М. Яровий, Т. А. Алешечкіна, В. В. Виноградов, В. А. Левада. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції. Харків, 2014. С. 138–142.
5. Дривинг А. Я. Стойкость мачт на оттяжках. Москва: Изд-во литературы по строительству, 1964. 112 с.
6. Перельмутер А. В. SCADOffice. Розрахунок щогл на відтягненнях. Київ: Вид-во СКАД СОФТ, 2004. 46 с.
7. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Изд. 4-е, перераб. Москва: Изд-во СКАД СОФТ, 2011. 736 с.

8. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Э. Ф. Мищенко. Москва: Наука, 1969. 384 с.
 9. Хог Е., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций. Москва: Мир, 1988. 428 с.
 10. Об одной модельной задаче оптимизации мачт мобильной связи / В. Б. Гринев, Ю. Н. Яровой, Т. А. Алешечкина, В. В. Виноградов, В. А. Левада. Материалы IV Международной научно-технической интернет-конференции. Харьков, 2014. С. 138–142.
 11. Editor Madugula. Dynamic response of lattice towers and guyed masts (Committee rapport) : Editor Madugula. M.K.S. Reston (US) ASCE, 2002. P. 266.
 12. Smith B. W. Communication structures : Smith B. W. Thomas Telford, 2007. P. 352.
-

Гриньов Володимир Борисович, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної та теоретичної механіки Харківського національного університету будівництва та архітектури (ХНУБА). E-mail: vladimir.grinyov@gmail.com.

Виноградов Віталій Володимирович, асистент кафедри будівельної та теоретичної механіки Харківського національного університету будівництва та архітектури. E-mail: vitaliy.rda@gmail.com.

Grinyov Vladimir, Dr.Sc. (Tech.), professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, Kharkiv National University of civil engineering and Architecture. Email: vladimir.grinyov@gmail.com.

Vynogradov Vitaliy, Assistant Professor, Department of Structural and Theoretical Mechanics, Kharkiv National University of civil engineering and Architecture. Email: vitaliy.rda@gmail.com.

Статтю прийнято 16.11.2020 р.

УДК 624.012.45

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ

Здобувач Р. Б. Каплін

CALCULATION OF RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE FLIGHT STRUCTURES

Postgraduate student R. Kaplin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230033>

***Анотація.** У статті розглянуто нову конструкцію сталезалізобетонної прогонової будови з використанням перфорованих металевих елементів та ефективної залізобетонної плити проїзної частини. На її базі сформовано розрахункову модель у скінченноелементній формі, побудованій в програмному комплексі SCAD-Office. В результаті розрахунків отримано компоненти напружено-деформованого стану (НДС) споруди. На основі отриманих результатів проведено розрахунок надійності споруди під впливом сучасних нормативних навантажень.*

***Ключові слова:** надійність, характеристика безпеки, коефіцієнти варіації, сталезалізобетон, прогонова будова, перфорована балка.*

***Abstract.** A large number of bridges are operated on the roads of Ukraine. The increase in the intensity and speed of traffic leads to qualitative changes in the operating conditions of bridge*

structures, which is characterized by a sharp increase in the number of cycles under load of bridge elements, and to the development of damage in them. For trouble-free operation and efficient use of bridge structures it is very important to have reliable estimates of the actual load capacity and resource, taking into account the loads, material quality, nature of the structure.

The solution of the problem in this statement is possible only on the basis of the theory of reliability. However, its application to specific assessments of durability and reliability of structures is associated with the solution of a set of issues: the identification of patterns of change of various parameters, the accumulation of reliable and easy to calculate statistics on loads and mechanical characteristics of materials, etc. It is necessary to know that the strength of the material (sample) of the structural element and the structure as a whole are completely different things. The article considers a new design of reinforced concrete girder structure, using perforated metal elements and an effective reinforced concrete slab of the carriageway. On its basis, a computational model in the form of a finite-element model built in the SCAD-Office software package is formed. As a result of calculations, the components of the stress-strain state of the structure are obtained. Based on the obtained results, the reliability of the structure was calculated under the influence of modern regulatory loads.

Keywords: reliability, safety characteristics, coefficients of variation, reinforced concrete, girder structure, perforated beam.

Вступ. Як відомо, надійність є комплексною властивістю, яка включає безвідмовність, довговічність і ремонтпридатність. Показник надійності – кількісна характеристика однієї або декількох властивостей, що складають надійність конструкції. До таких властивостей належать показники міцності при різних видах руйнування, стійкості, прогинів, кутів повороту, амплітуд коливань, виникнення та розкриття тріщин в залізобетоні, ступені корозії арматури [1]. Теорія надійності і довговічності автодорожніх мостів дозволяє вирішувати завдання визначення надійності і залишкового ресурсу прогонових будов у процесі експлуатації.

У даний час, згідно з вимогами нормативних документів, що діють в Україні, розрахунок будівельних конструкцій та основ виконується за методом граничних станів. Відповідно до них, вплив на споруду подають у вигляді якихось усереднених (найчастіше максимальних) детермінованих значень. Вплив можливої мінливості цих значень враховується шляхом уведення різних коефіцієнтів. Насправді ж фактори, що впливають на НДС системи, є випадковими величинами: навантаження і впливи,

міцність і деформативність будівельних конструкцій. Таким чином, для вирішення завдань надійності будівель та споруд може бути застосований імовірнісний (стохастичний) підхід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Модель оцінки надійності К. А. Корнелла сьогодні стала визнаним інструментом управління надійністю проєктованих конструкцій не тільки в країнах Європи в рамках Єврокодів, але і у всьому світі. Його узагальнення послужили базою для подальшого розвитку методу в роботах П. Тофт-Крістенсена, М. І. Бейкера і О. Дітлевсен, які подали концепцію визначення характеристики безпеки в найзагальнішому випадку.

Значний внесок у розвиток теорії надійності і довговічності будівельних конструкцій зробили вчені: Ржаніцин А. Н., Лантух-Лященко А. І. [1], Іосілевський Л. І., Пірадова К. А., Болотін В. В., Пічугін С. Ф., Перельмутер А. В. та ін.

У роботах [1, 3] автор подає основні етапи на шляху розвитку та впровадження ідей надійності в будівельне проєктування. В роботі [2] розглянуті основні концепції розрахунків надійності за нормативними документами Єврокод.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – розрахунок надійності ефективних конструкцій сталезалізобетонних прогонових будов мостів.

Об'єкт дослідження – ефективні конструкції сталезалізобетонних прогонових будов мостів.

Завдання дослідження. Розрахунок надійності сталезалізобетонної прогонової будови нового типу. Для вирішення поставленого завдання була побудована розрахункова модель запропонованої конструкції з її подальшим розрахунком на сучасні рухомі навантаження та отриманням необхідних компонентів НДС.

Предмет дослідження – створення полегшених сталезалізобетонних прогонових будов мостів нового типу з використанням перфорованих металевих балок та ефективної залізобетонної плити.

Основна частина дослідження. Розрахунки надійності, згідно з діючими нормами проектування мостів [4, 5, 6], мають стохастичний характер. Імовірнісні розрахунки за критерієм надійності мають на меті пошук оптимального проекту при заданому рівні безпеки. Критерієм приймається характеристика безпеки β . Для елемента, що проектується, необхідно перевіряти виконання нерівності (1)

$$\beta \geq \beta_{nom}, \quad (1)$$

де β_{nom} – прописане нормативними документами [1] мінімальне значення характеристики безпеки; β – значення характеристики безпеки, отримане в результаті розрахунків.

Значення характеристики безпеки обчислюється виразом (2)

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \gamma_0^2 + V_Q^2}}, \quad (2)$$

де γ_0 – узагальнений коефіцієнт запасу, тобто статичне середнє значення реального коефіцієнта запасу; V_R і V_Q – коефіцієнти

варіації опору R і навантаження Q відповідно.

Узагальнений коефіцієнт запасу знаходимо за формулою (3)

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_Q}. \quad (3)$$

Математичні очікування статичного середнього узагальненого опору елемента і статичного середнього узагальненого навантаження елемента, за умови нормального розподілу, визначаються за формулами (4) та (5)

$$\mu_R = \frac{R_n}{(1 - 1.64V_R)}, \quad (4)$$

$$\mu_Q = \frac{Q_n}{(1 + 1.64V_Q)}, \quad (5)$$

де R_n – значення несучої здатності; Q_n – значення навантаження конструкції;

V_R і V_Q – коефіцієнти варіації опору R і навантаження Q відповідно.

Значення коефіцієнтів варіації були прийняті відповідно до нормативних документів [1]. Необхідні для обчислень коефіцієнти варіації рухомих і постійних навантажень наведені в табл. 1–5 [2].

Що ж стосується узагальнених коефіцієнтів варіації опору, то вони вираховуються за даними таблиць за формулою (6)

$$V = \sqrt{\sum_1^n V_i^2 + \sum_1^n V_i^2 V_j^2}, \quad i, j=1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

де n – кількість випадкових змінних.

За отриманими значеннями характеристики безпеки β можна визначити надійність перерізу за формулою (7)

$$p_f = \Phi(-\beta). \quad (7)$$

Таблиця 1

Коефіцієнти варіації V_Q тимчасових рухомих навантажень А-15

Тип навантаження	Випадок застосування	Коефіцієнти варіації V_Q
Тандем	У розрахунках елементів проїзної частини мостів	0,17
	У розрахунках решти елементів мостів	0,17 при $\lambda < 30\text{ м}$ 0,07 при $\lambda \geq 30\text{ м}$
Рівномірно-розподілене навантаження	У всіх розрахунках конструкцій мостів на вертикальні і горизонтальні дії від рухомого навантаження	0,24

Таблиця 2

Коефіцієнти варіації V_Q постійних навантажень і впливів

Навантаження і впливи	Позначення чинника	Коефіцієнти варіації V_Q
Власна вага	$g1$	0,033
Ексцентриситет точки фіксації сили попереднього напруження	e_n	0,0167
Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів	$g2$	0,170
Вплив повзучості бетону	$g3$	0,030

Таблиця 3

Коефіцієнти варіації V_R геометричних характеристик поперечного перерізу елемента

Геометричні характеристики	Позначення чинника	Коефіцієнти варіації V_R
Площа поперечного перерізу елемента	A_{red}	0,0237
Момент опору поперечного перерізу елемента	W_{red}	0,0229

Таблиця 4

Коефіцієнти варіації V_R арматури залізобетонних елементів

Клас арматури	AI–AIII	AIV–AV	AVI	ATIV	ATV	ATVI	AIIIВ
Коефіцієнти варіації V_R	0,07	0,09	0,04	0,08	0,07	0,08	0,06

Таблиця 5

Коефіцієнти варіації V_R міцності бетону

$R_{b,28}$, МПа	10	20	30	40	50	60	70	80
При натуральному твердінні	0,159	0,129	0,105	0,082	0,066	0,054	0,051	0,051
При тепловій обробці	0,121	0,111	0,094	0,090	0,078	0,066	0,055	0,052

З метою визначення компонентів напружено-деформованого стану позначеної конструкції в програмному комплексі SCAD-Office була створена скінченноелементна модель середнього прогону моста

(рис. 3). Модель складається з оболонок нульової гауссової кривизни та стрижнів. Як навантаження прийнято власну вагу конструкції прогонової будови і дві схеми рухомих навантажень А-15 та НК-100.

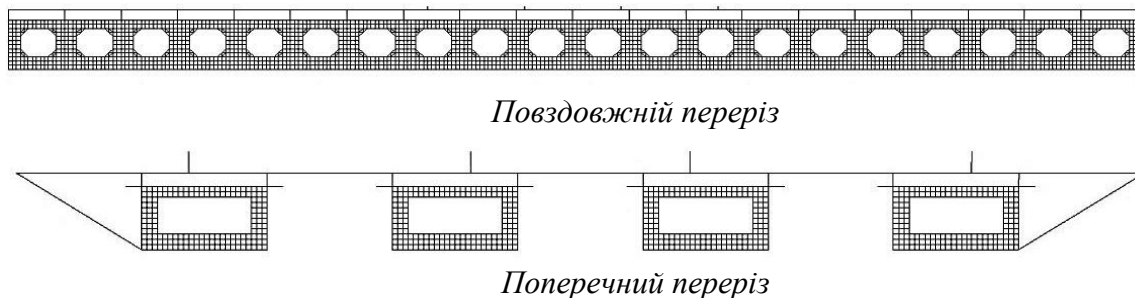


Рис. 3. Скінченноелементна модель прогонової будови

Як вихідні параметри, необхідні для розрахунку чисельних показників надійності, прийнято:

- значення нормальних і дотичних напружень;
- значення допустимих нормальних і дотичних напружень;
- значення коефіцієнтів варіації навантажень;
- значення коефіцієнтів варіації матеріалів.

Щоб отримати значення допустимих нормальних і дотичних напружень, використовувалася енергетична теорія граничного напруженого стану (Губера-Мізеса-Генки). Відповідно до цієї теорії

значення допустимих нормальних і дотичних напружень можна отримати, використовуючи головні напруження (8)

$$\begin{cases} 2\sigma_{don}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \\ 6\tau_{don}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \end{cases} \quad (8)$$

де за $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ було прийнято значення головних напружень s_1, s_2, s_3 , отримані в результаті комп'ютерного моделювання.

Необхідні для розрахунків дані наведено в табл. 6–7.

Результати розрахунків наведено у табл. 8.

Таблиця 6

Сумарні значення напружень в елементах конструкції

Напруження, кН/м ²	Елементи конструкції	
	Залізобетонна плита	Металева частина
N _x ,	7706,16	590917,64
N _y	6553,20	536105,04
τ _{xy}	2839,22	298857,66
s ₁	20442,94	454923,92
s ₂	0	0
s ₃	42069,45	998377,58

Таблиця 7

Значення допустимих нормальних та дотичних напружень в елементах

Напруження, кН/м ²	Залізобетонна плита	Металева частина
σ	36441,51	865731,06
τ	21035,26	499844,95

Таблиця 8

Результати розрахунків

Елемент конструкції	Керуючий параметр	γ_0	B	P_f
Залізобетонна плита	N_x	8,839	6,918	1
	N_y	10,394	7,119	1
	τ_{xy}	13,851	7,391	1
Металева частина	N_x	2,739	3,849	0,99994
	N_y	3,019	4,221	0,99999
	τ_{xy}	3,066	4,279	1

Як видно з таблиці, отримані значення характеристики надійності перевищують рекомендовані.

Висновки:

1. У роботі наведено методику визначення надійності елементів нової ефективної прогонової будови мостових конструкцій, де як вихідні параметри, необхідні для розрахунку чисельних показників надійності, прийнято значення нормальних і дотичних напружень, які отримано шляхом скінченноелементного

модельювання конструктиву в ПК Scad-Office.

2. Як об'єкт дослідження прийнято нову ефективну полегшену модульну конструкцію балково-розрізної сталезалізобетонної прогонової будови мосту, отриманої на базі експлуатації принципів прямого проектування.

3. Результати оцінки надійності запропонованого конструктивного рішення прогонової будови підтверджують його позитивність і репрезентативність для подальшого дослідження та вдосконалення.

Список використаних джерел

- Лантух-Лященко А. И. Развитие идей надежности в строительной области. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2015. Вип. 1. С. 2–8.
- Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в еврокоде. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 6. 8 с.
- Мости: конструкції та надійність / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. М. Корнєєв, А. І. Лантух-Лященко, М. Р. Хархаліс; за ред. В. В. Панасюка і Й. Й. Лучка. Львів: Каменяр, 2005. 989 с.
- ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.
- ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд будівельних конструкцій та основ. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 42 с.
- ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ: Мінрегіон України, 2013. 49 с.

7. Шмуклер В. С., Клімов Ю. А., Бурак Н. П. Каркасні системи полегшеного типу. Харків: Золоті сторінки, 2008. 336 с.

8. Rational Design of Structural Building Systems / V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel, A. Lantoukh-Liashchenko, V. Shevetovsky, O. Shimanovskyi, V. Shmukler, M. Sukhonos. DOM publishers, Berlin/Germany. (2019). 384 p. URL: <https://dom-publishers.com/collections/handbuch-und-planungshilfe/products/rational-design-for-structural-building-systems>.

9. Efficient construction of the motorway and highway bridge superstructure (experimental studies) / V. Babaev, M. Bekker, V. Shmukler, S. Bugaevskiy, R. Kaplin, Y. Krul. Matec of Web Conferences, 02003 (2017).

Каплін Роман Борисович, завідувач сектору лабораторії будівельно-технічних досліджень Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.
E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Roman Kaplin, head of the sector of the of construction and technical research laboratory of the National Research Center «Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations», postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Статтю прийнято 30.11.2020 р.

УДК 624.012.45

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОТКИХ СТАЛЕБЕТОННИХ КОЛОН НА СТАТИЧНІ ВПЛИВИ

Асп. М. Т. Хаммуд, Р. М. Пчолкін

EXPERIMENTAL STUDY OF SHORT STEEL CONCRETE COLUMNS ON STATIC INFLUENCES

Postgraduate student M. T. Hammoud, R. M. Pcholkin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230039>

***Анотація.** У статті розглянуто питання планування експерименту з випробування зразків коротких сталобетонних колон на статичні впливи. Експериментальні зразки подано трьома серіями: бетонні круглі колони (6 шт.), бетонні колони в сітчастій обоймі (6 шт.) та бетонні колони в сітчастій обоймі, підкріпленій шпангоутами (6 шт.). Наведено процедуру визначення необхідної кількості дослідних зразків та їх підготовки до випробування. Наведено конструктивні особливості зразків трьох дослідних серій. Отримано результати визначення міцності бетону на стиск.*

***Ключові слова:** бетонні колони, шпангоут, сітчаста обойма, просічно-витяжний лист.*

***Abstract.** The paper considers the issues of planning an experimental tests of samples of short reinforced concrete supports for static effects. The procedure for determining the required number of samples and their preparation for testing is given. To determine the needed amount of supports the Latin square is used. The variable parameters for such type of construction are the followed: concrete*

class, the thickness of the expanded-exhaust sheet, the size of the cell of the average-exhaust sheet, geometric parameters of the support (diameter and height), diameter and pitch of frame and the degree of adhesion of concrete to metal. Experimental samples are presented in three series: round concrete supports(6 pcs.), concrete supports in a mesh holder (6 pcs.) and concrete supports in a mesh holder supported by outer frames (6 pcs.). The height of each support is about 1000mm, the diameter is 450 mm. Based on the presented methodology, 18 prototypes were prepared for testing, which were made on the construction site of "Avantazh" ICC. For convenience of production of supports concreting is executed in a disposable cardboard framework. The diameter of the mesh holder is 400 mm, thus, the protective layer of concrete is 25 mm. The connection of the holder is made by butt welding without overlays. The frames are made of Ø12A400C reinforcement bars of periodic profile. Before conducting a series of experimental studies, standard tests of structural materials were performed, in particular, determination of the cubic strength of concrete. Simultaneously with the testing of standard samples of cubes, the establishment of the actual concrete classes of the test samples was performed using a non-destructive test with the ONYX-2.5 device. Together with determining the concrete classes, geometrical characteristics of samples were defined. A P-500 hydraulic press for testing of building structures is used as the main power plant. The loading of the samples is planned to be realized stepwise through two headers in the form of steel disks till the moment of distruction.

Keywords: concrete support, frame, mesh holder, flat-exhaust sheet.

Вступ. Важливою частиною будь-яких досліджень є експериментальна верифікація теоретичних результатів. Ця обставина особливо важлива при розробці нових конструктивних рішень, оскільки надає змогу отримати найбільш повну інформацію про поведінку конструктиву під навантаженням та особливості його напружено-деформованого стану. Раніше [1–3] було запропоновано конструктивне

рішення бетонної колони, яка являє собою бетонний елемент трубчастого типу, укладений в сітчасту сталеву обойму. Співвідношення діаметра та висоти бетонного циліндра таке, що виключається втрата стійкості. Додатково запропоновано підсилення бетонної колони в сітчастій обоймі арматурними кільцями, що розташовуються з однаковим кроком зовні сітчастої оболонки (рис. 1).

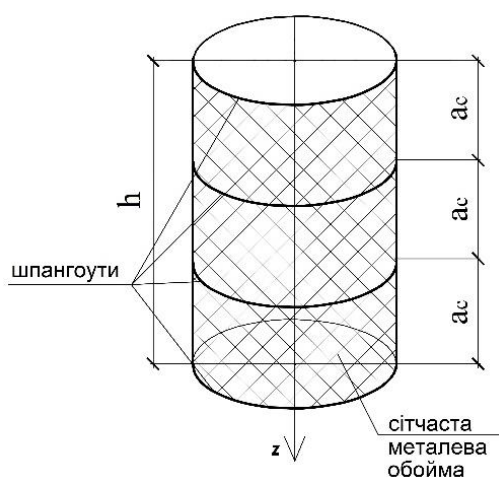


Рис. 1. Загальний вигляд бетонної колони в сітчастій обоймі зі шпангоутами:
 h – висота колони; a_c – крок шпангоутів

На розвиток вирішеної задачі раціоналізації структури циліндричної залізобетонної колони [1–3] запропоновано проведення циклу експериментальних досліджень на дію статичних навантажень для підтвердження отриманих теоретичних результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування сталобетонних несучих елементів набуло розповсюдження у світовій практиці будівництва у вигляді колон цивільних та промислових будівель, опор залізничних та автомобільних мостів тощо. На даний момент найбільш поширені трубобетонні конструктиви, що передбачають заповнення бетоном суцільних металевих труб [4]. Це рішення дозволяє знизити витрати бетону, відмовитись від опалубних робіт та збільшити несучу здатність конструктиву у порівнянні з традиційними залізобетонними колонами, проте вимагає додаткового антикорозійного захисту сталеві оболонки.

Більш раціональним шляхом економії металу і бетону є застосування непрямого армування [5–7]. Зокрема, сьогодні разом зі спіральним армуванням також відоме рішення, що передбачає виготовлення зовнішніх армувальних сіток з просічно-витяжного листа [8]. Автором [9] отримані теоретичні та експериментальні результати, які підтверджують, що несуча здатність таких колон рівнозначна несучій здатності колон в суцільній металевій оболонці, та визначений коефіцієнт збільшення несучої здатності досліджуваних зразків у залежності від орієнтування чарунок просічної обойми. Таким чином, елементи в просічно-витяжній обоймі вирізняються простішою технологією виготовлення, меншою вагою та кращою вогне- та корозійною стійкістю, ніж відомі аналоги.

Визначення мети та завдання дослідження. У зв'язку із вищезазначеним у цій роботі подано процедуру підготовки дослідних зразків коротких сталобетонних колон у просічній обоймі для випробування на дію статичних впливів. *Метою роботи є*

встановлення несучої здатності для бетонних зразків, які подано трьома серіями, описаними далі.

Основна частина дослідження. В ході проведення випробувань з метою перевірки якості будівельних конструкцій і виробів, оцінки їх міцності і деформативності виконуються вимірювання певних технічних параметрів. Проведення експериментальних досліджень вимагає їх завчасного і всебічного планування, визначення числа і умов постановки експериментів, необхідних і достатніх для вирішення задачі із заданим ступенем точності. В даний час, з розвитком теорії подібності та розмірностей, можливе лабораторне проведення випробувань з використанням моделей конструкцій [10]. Це дозволяє істотно спростити процес вивчення об'єкта, скласти деякі закономірності його поведінки, а також проаналізувати характер і особливості напружено-деформованого стану. Крім того, лабораторні дослідження надають можливість створення певних умов довкілля.

Планування експерименту [11] розглядає сам експеримент як предмет дослідження, результатом вивчення якого є отримання інформації про досліджуваний об'єкт, будь то конструкція, будівля або споруда. Дослідження і подальша оптимізація складних систем за допомогою методів планування експерименту [12] проводиться в кілька етапів. У першу чергу слід створити умови, які сприятимуть виявленню впливу чинників, які пов'язані з шуканою характеристикою конструкції. Відповідно до норм, при виборі умов випробувань слід відібрати фактори, що впливають на питому характеристику, описати функціональну залежність характеристики від цих чинників, встановити діапазон їх зміни, визначити область факторного простору, в якому слід проводити експеримент, а також оцінити необхідну кількість експериментів і порядок їх реалізації.

Так, при визначенні несучої здатності бетонних колон в обоймі найбільш значущими факторами слід назвати такі:

- клас бетону;
- товщина та розміри чарунки просічно-витяжного листа;
- діаметр та крок шпангоутів;
- геометричні параметри колони (діаметр та висота);
- ступінь адгезії бетону до металу.

Найбільш істотний вплив на несучу здатність і деформативність таких конструктивів панелей, при інших рівних факторах, мають перші три позиції, які головним чином визначають їх експлуатаційні характеристики. В такому випадку необхідно скористатися латинським квадратом (рис. 2), який враховує спільний вплив трьох найбільш значущих в даному випадку факторів. Кількість спостережень, які при цьому слід провести, буде мінімальною.

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} (1,1) & (2,2) & (3,3) \\ (2,3) & (3,1) & (1,2) \\ (3,2) & (1,3) & (2,1) \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Ортогональні латинські квадрати

Число зразків, які слід випробувати, позначимо m . Щоб отримати результат з допустимою дисперсією S^2 , слід скористатися виразом

$$S^2 = \frac{\sigma^2 (M-m)}{m (M-1)}, \quad (1)$$

де M – загальне число виробів у партії;
 σ^2 – дисперсія досліджуваної характеристики.

Чимале M дозволяє покласти

$$S^2 = \frac{\sigma^2}{m}. \quad (2)$$

При проведенні експерименту належить випробувати m зразків коротких бетонних колон: суто бетонних, бетонних у металевій сітчастій обоймі та зі шпангоутами для визначення впливу наявності обойми та шпангоутів на несучу здатність коротких колон.

Припустимо, що генеральна дисперсія по всій виборці з партії виробів дорівнює $S^2 = 0,1$, а допустима дисперсія $\sigma^2 = 0,6$, отримаємо

$$m = \frac{\sigma^2}{S^2} = \frac{0,1}{0,6} = 6. \quad (3)$$

Отже, в ході експерименту необхідно випробувати по шість зразків коротких колон в кожній партії (серії). Дана мінімальна вибірка є репрезентативною для виконання статистичної обробки отримуваних результатів.

На основі поданої методики для випробування підготовлено 18 дослідних зразків, що були виготовлені на будівельному майданчику ІБК «Авантаж». Для зручності виготовлення колон бетонування виконане в одноразовій картонній опалубці товщиною 3,0 мм (рис. 3).

Дослідний зразок, в загальному випадку, являє собою коротку бетонну колону висотою близько 1000 мм та діаметром 450 мм. Серед забетонованих колон виокремлено три серії зразків: БС-0 – суто бетонні стійки (рис. 4, а); БС-П – бетонні колони з сітчастою обоймою з просічно-витяжного листа (рис. 4, б); БС-ПШ – бетонні колони з обоймою з просічно-витяжного листа та додатково підкріплені арматурними шпангоутами (рис. 4, в). У кожній серії виготовлено по шість зразків.



Рис. 3. Загальний вигляд бетонних зразків до (зліва) та після (справа) видалення картонної опалубки

Діаметр просічної обійми складає 400 мм, таким чином, захисний шар бетону складає 25 мм. З'єднання обійми виконане зварюванням встик без накладок.

Шпангоути виконані з арматури періодичного профілю $\text{Ø}12 \text{ A400C}$ та встановлені з кроком відповідно до рис. 4, в.

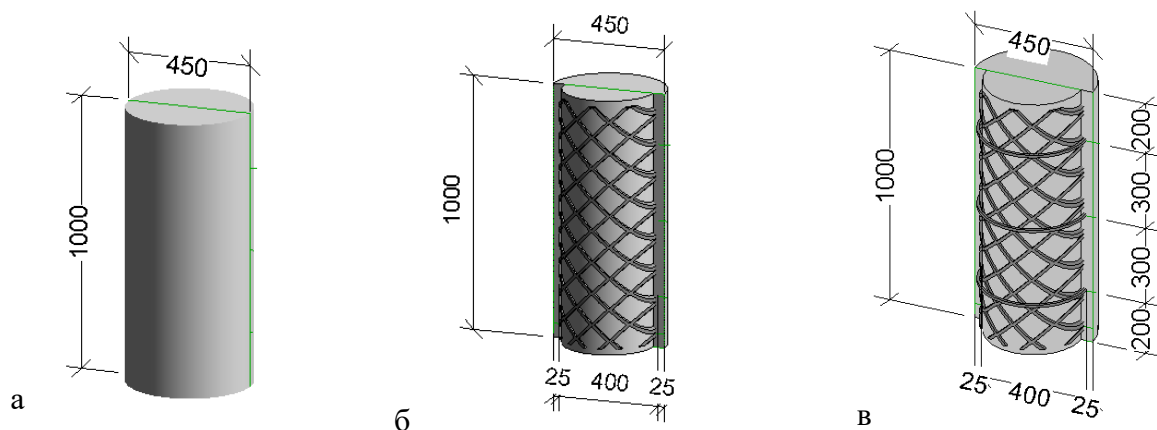


Рис. 4. Геометричні параметри бетонних зразків серій: а – БС-0; б – БС-П; в – БС-ПШ

Після видалення картонної опалубки стало очевидним, що для установлення зразків під час випробування в пресі верхня та нижня поверхні зразків є недостатньо горизонтальними. У зв'язку з цим для вирівнювання поверхонь та ідеального стикування з пластинами пресу застосована спеціальна високоміцна ремонтна суміш РС 3 виробництва «Prof Line» [13]. Для

зручності виокремлення кожної з серій (рис. 5) всі зразки були пронумеровані та замарковані за допомогою водоемульсійної фарби.

Перед проведенням циклу експериментальних досліджень виконані стандартні випробування матеріалів конструктиву, зокрема, визначення кубикової міцності бетону.



Рис. 5. Маркування серій зразків: а – бетонний зразок серії БС-0 (• 1-3); б – бетонний зразок з обіймою серії БС-П (X 1-3); в – бетонний зразок з обіймою і шпангоутами серії БС-ПШ (Ж 1-3)

Визначення міцності бетону виконано відповідно до діючого нормативу ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [14]. Визначення міцності полягає у визначенні мінімальних зусиль, що руйнують спеціально виготовлені контрольні зразки бетону, при статичному навантаженні з постійною швидкістю зростання навантаження та подальшим визначенням напружень при цих зусиллях.

Для визначення міцності на стиск форма і номінальні розміри контрольного зразка відповідали стандарту [14], згідно з яким, у випадку найбільшого розміру зерна заповнювача 20 мм і менше, стандартний розмір куба складає 100 мм. Зразки виготовлені та випробувані в кількості шістьох штук. Відхилення від площини опорних поверхонь кубів, що прилягають до плит пресу, не перевищувало 0,1 мм; відхилення від перпендикулярності суміжних граней кубів не перевищувало 1 мм.

Відбір проб бетонної суміші для виготовлення контрольних зразків виконаний згідно з вимогами стандарту [14] одночасно з виготовленням експериментальних конструктивів. Зразки виготовлювались у повірених формах. Перед випробуванням зразки були піддані візуальному огляду. Дефекти у вигляді відколів ребер, раковин, чужорідних включень не виявлені.

При випробуваннях зразки-куби встановлювались однією з вибраних граней на нижню опорну плиту пресу центрально відносно його поздовжньої осі, використовуючи риски, нанесені на плиту преса (рис. 6).

Максимальні зусилля, досягнуті в процесі випробувань, прийняті за руйнівне навантаження відповідного зразка (табл. 1). Зруйновані зразки також були піддані візуальному огляду з метою визначення характеру пошкоджень, наявності крупних (обсягом більше 1 см³) раковин та каверн всередині зразка, наявності зерен заповнювача більше $1,5d_{max} = 30$ мм, грудок глини, слідів розшарування. Зразків, що мають перераховані дефекти структури та характеру руйнування, виявлено не було.

Міцність бетону визначають з точністю до 0,01МПа згідно зі стандартами [14] та ДБН [15] для кожного зразка за формулою

$$f_{ck, cube} = \alpha \frac{N_{руйн}}{A_c}, \quad (4)$$

де N – руйнівне навантаження, кН; A_c – площа робочого перерізу зразка, мм²; α – масштабний коефіцієнт для приведення міцності зразка до міцності бетону базового розміру та форми (для куба 100x100x100 $\alpha=1$).



Рис. 6. Стандартні випробування з визначення кубикової міцності бетону на стиск у пресі ПСУ-250

Міцність бетону визначалась як середнє арифметичне значення в серії з шести зразків за формулою

$$f_{ck, cube} = \frac{\sum f_{ck, cube}}{n}, \quad (5)$$

де n – кількість i зразків кубів.

У результаті проведених стандартних випробувань бетонних кубів на стиск було встановлено клас бетону, рівний С25/30.

Таблиця 1

Визначення кубикової міцності бетону

№ зразка	Розміри куба, мм	Площа куба A_c , 10^{-2} , м ²	Руйнівне навантаження, кН	$f_{ck, cube, i}$, МПа	$f_{ck, cube}$, МПа	Згідно з ДБН В.2.6-98:2009	
						Встановлений клас бетону	$f_{ck, cube}$, МПа
1	101x100x101	1.01	346	34.6	29.84	С25/30	30.00
2	99x100x99	0.99	225	22.73			
3	100x100x99	1.00	271	27.1			
4	99x99x100	0.98	258	26.33			
5	100x100x101	1.00	268	26.8			
6	101x100x101	1.01	419	41.48			

Одночасно з випробуванням стандартних зразків кубів виконано встановлення фактичних класів бетону власне дослідних зразків за допомогою неруйнівного дослідження приладом

ОНІКС-2.5. Виконано роботи з встановлення фактичних геометричних характеристик забетонуваних колон (рис. 7). Результати вимірів геометричних та фізико-механічних характеристик зразків наведено

в табл. 2. Як основна силова установка використовується прес гідравлічний для випробування будівельних конструкцій П-500, верхня опорна плита якого закріплена на рухомій траверсі і має сферичну опору

для самостійного устанавлення (рис. 7). Навантаження зразків планується реалізувати ступінчасто через два оголовники у вигляді сталевих дисків з листа товщиною 20 мм.



Рис. 7. Підготовка зразків до випробувань

Таблиця 2

Встановлені фізико-механічні та геометричні характеристики зразків*

№ спроби: клас (міцність, МПа)	Номери зразків								
	●1	●2	●3	X1	X2	X3	Ж1	Ж2	Ж3
1	B22.5 (31.4)	B25 (32.6)	B22.5 (29.5)	B22.5 (31.4)	B27.5 (38.4)	B30 (40.3)	B15 (22.9)	B25 (34.9)	B20 (28.8)
2	B27.5 (37.6)	B22.5 (30.7)	B22.5 (30.9)	B22.5 (29.7)	B25 (33.7)	B22.5 (30.1)	B20 (28.1)	B27.5 (37.0)	B25 (33.3)
3	B22.5 (32.0)	B22.5 (29.8)	B22.5 (30.8)	B27.5 (36.5)	B30 (40.2)	B22.5 (29.9)	B22.5 (29.9)	B20 (26.5)	B27.5 (34.3)
4	B25 (35.2)	B 25 (34.4)	B27.5 (38.5)	B25 (31.4)	B15 (23.3)	B25 (32.3)	B15 (23.2)	B22.5 (29.8)	B27.5 (36.3)
5	B25 (33.1a)	B35 (41.0)	B25 (32.6)	B20 (28.2)	B22.5 (30.0)	B25 (32.1)	B25 (32.3)	B22.5 (31.9)	B30 (40.8)
6	B22.5 (30.5)	B25 (37.5)	B22.5 (30.1)	B20 (26.6)	B25 (32.5)	B27.5 (35.4)	B20 (26.6)	B25 (32.1)	B25 (32.1)
Середня міцність, МПа	32.93	33.8	31.10	30.175	33.65	32.475	26.875	29.875	34.0
Встановле- ний клас за $f_{ck,cube}$	C25/3 0	C25/3 0	C25/3 0	C25/3 0	C25/3 0	C25/3 0	C20/2 5	C20/2 5	C25/3 0
Міцність $f_{ck,prism}$, МПа	22	22	22	22	22	22	18.5	18.5	22
Висота зразка, см	97.5	96.5	98.5	97.0	98.5	100	97.7см	98.0	103см

*Кольором позначені спроби, які не враховувались при визначенні класів бетону

Висновки. В статті запропоновано конструктивне рішення залізобетонної колони в сітчастій оболонці з просічно-втяжного листа, підкріпленої арматурними шпангоутами. Наведено технологічну послідовність підготовки зразків до випробувань на статичні впливи та результати встановлення їх фізико-механічних та геометричних характеристик. У подальшому заплановано цикл випробувань позначених зразків на статичні

впливи для визначення руйнівного зусилля та поведінки конструктиву під навантаженням. Дослідження зразків проводитиметься шляхом порівняння та зіставлення отриманих результатів для трьох виготовлених серій (суто бетонних колон, бетонних колон у сітчастій оболонці та зразків в оболонці зі шпангоутами) між собою та з отриманими раніше результатами теоретичних досліджень [1–3].

Список використаних джерел

1. On the criterion of the Limit State for Concrete / H. Mohammad, V. Shmukler, P. Reznik and O. Petrova. Proc. of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Prague, Czech Republic, 2018. P. 593–599.
2. Shmukler V., Petrova O., Mohammad H. Rationalization of the parameters of the cylindrical bridge support (theoretical basis). MATEC Web of Conferences 230, 02031 (2018).
3. Shmukler V., Petrova O., Mohammad H. To the rationalization of the constructive solutions of the bridge supports. MATEC Web of Conferences 116, 02025 (2017).
4. Стороженко Л. І., Єрмоленко Д. А., Демченко О. В. Несуча здатність коротких сталевих труб, заповнених високоміцним бетоном. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. Серія: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. 2013. Вып. 69. С. 492–496.
5. Ahmed M. El-Kholy, Hany Dahish. Improved confinement of reinforced concrete columns. *Ain Shams Engineering Journal*, 34(2). 2016. P. 717–728.
6. Jianqi Wang. Behaviour of ferrocement columns under static and cyclic loading. PhD dissertation. School of mechanical, aerospace and civil engineering, 2013.
7. Mohamed M. Masaoud, Ahmed M. El-Kholy, Magdy A. Abd El-Aziz. Enhanced Ferrocement Jackets for Strengthening Long Reinforced Concrete Columns. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* Vol. 10, Issue 08, 2019. P. 61–72.
8. Сильковская Е. В., Суржан Е. А. Сталебетонные цилиндрические несущие элементы опор зданий и сооружений нового типа, их несущая способность. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2014. Вип. 149. С. 169–178.
9. Шмуклер В. С., Сильковская Е. В. Экспериментальные исследования сталебетонных столбчатых мостовых опор при внецентренном малоцикловом сжатии. *Будівельні конструкції*. 2013. Вип. 79. С. 363–369.
10. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт, 2005. 344 с.
11. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 280 с.
12. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. Москва: Наука, 1976. 390 с.
13. ТОВ «СБС-ІНВЕСТ». URL: <https://www.proflinew.ua/> (дата звернення: 10.12.2020 р.)

14. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

15. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.

Хаммуд Мохаммад Тахран, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-5509-8741.

E-mail: hammoud.m.t@outlook.com.

Пчолкін Руслан Миколайович, директор з розвитку ТОВ «СБС-Інвест». E-mail: pcholkinrn@gmail.com.

Mohammad Hammoud Tahran, postgraduate student at the Department of Building Structures of O. M. Beketov NUUE in Khrakiv. ORCID ID: 0000-0002-5509-8741. E-mail: hammoud.m.t@outlook.com.

Pcholkin Ruslan, Development Director of «SBS-INVEST» LLC. E-mail: pcholkinrn@gmail.com.

Статтю прийнято 01.12.2020 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 629.4.048.7

**ЗНИЖЕННЯ НЕПРОДУКТИВНИХ ВИТРАТ ТЕПЛА ПАСАЖИРСЬКОГО
РУХОМОГО СКЛАДУ В ОПАЛЮВАЛЬНИЙ ПЕРІОД**

Кандидати техн. наук Е. В. Білошицький, А. О. Ловська, магістр С. С. Мямлін

**REDUCTION OF UNPRODUCTIVE HEAT CONSUMPTIONS OF PASSENGER
ROLLING STOCK IN THE HEATING PERIOD**

PhD (Tech.) E. V. Biloshytskyi, PhD (Tech.) A. O. Lovska, master S. S. Myamlin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230091>

***Анотація.** Досліджено способи підвищення енергоефективності систем опалення рухомого складу. Виявлено недоліки експлуатаційної документації, що збільшують непродуктивні витрати теплової енергії пасажирськими вагонами при експлуатації опалювальної установки з комбінованим електровугільним котлом в режимі електричного опалення. Встановлено недоліки існуючих конструкцій системи вентиляції пасажирських вагонів, які впливають на енергоефективність систем життєзабезпечення пасажирських вагонів. Визначено шляхи підвищення енергоефективності систем вентиляції пасажирських вагонів.*

***Ключові слова:** експериментальні виміри, пасажирський вагон, теплові процеси, система опалення.*

***Abstract.** Passenger rolling stock is an important component of passenger transportation services, which should ensure not only traffic safety, but also comfortable transportation conditions. Studies on the energy saving of railway rolling stock have revealed shortcomings in the operating documentation that increase the unproductive consumption of thermal energy by passenger cars during the operation of a heating system with a combined electric-coal boiler in electric heating mode.*

Experimental measurements confirmed the presence of unproductive losses of thermal energy through the intake blinds of the ventilation system due to the infiltration of outside air during downtime at the points of formation and turnover of passenger cars.

Also, experimental measurements showed that there is a leak of warm air through the deflectors to remove exhaust air from the car into the environment. This is their regular mode of operation, but as highlighted in the author's early publications there are two zones of temperature fields in the body of the passenger car with different temperature regimes, which are separated by a decorative ceiling. The results show that the leakage of warm air through the deflectors occurs from the temperature field zone with a higher temperature, which increases the unproductive consumption of thermal energy.

Thus, by making appropriate changes to the operating documentation based on the study, the energy efficiency of passenger rolling stock will be greatly improved in its further operation. In particular, it is established that the proposed modernization in order to increase the energy efficiency of the heating system can be carried out at relatively low cost, in modern car repair depots during overhauls, and also needs to be considered when designing new passenger cars.

***Keywords:** experimental measurements, passenger car, thermal processes, heating system.*

Вступ. Пасажирські перевезення, як відомо, є одним з основних видів діяльності залізничного транспорту. При цьому пасажирський рухомий склад є важливою складовою цього виду послуг, який має забезпечувати не тільки безпеку руху, але й комфортні умови перевезень. У цьому контексті енергозбереження – один з ключових чинників підвищення рентабельності залізничного транспорту. Встановлено два основні цільові показники енергозбереження, а саме: зниження енергоємності виробничої діяльності та підвищення її енергоефективності [1, 2].

Пасажирські вагони споживають чималу частку електроенергії для створення комфортних умов при перевезенні пасажирів, зокрема опалення займає значну частку електроенергії. Орієнтовно 20–40 % від загальної витраченої електроенергії під час перевезення пасажирів використовується для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря [3, 4]. В пунктах формування та обороту для підтримання температурного режиму в пасажирському вагоні потрібно автономне джерело енергії, як таке переважно використовується тверде паливо. При використанні твердого палива, зазвичай вугілля, ККД комбінованого електровугільного котла складає 0,40–0,65 залежно від якості твердого палива і розрідження в димовій трубі, що збільшує вартість теплової енергії на опалення приблизно на 50–60 % (залежно від якості твердого палива).

Тому дослідження, спрямоване на підвищення енергоефективності рухомого складу залізниць, є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кузов пасажирського вагона складається з каркаса, який зовні обшитий тонколистовою сталлю. В середині вагона до каркаса кріпиться внутрішнє облицювання, теплоізоляція вкладається між Z-подібними профілями каркаса, тобто огорожувальною конструкцією кузова вагона.

Тенденція до заміни металевих елементів у конструкціях неметалевими пояснюється, головним чином, їх недостатньою стійкістю до корозії і великою вагою металоконструкцій [5, 6]. Крім того, застосування неметалевих огорожувальних конструкцій створює перспективу поліпшення теплотехнічних показників кузовів вагонів, що підтверджує теплотехнічна модель конструкції огороження кузова, описана в [7], крім того, автори пропонують вносити до паспорта вагона показники теплопровідності огорожувальних конструкцій кузова [8]. Зазначимо, що заміна металевих елементів каркаса, розташованих у термоізоляційному шарі на склопластикові, може знизити коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій приблизно на 20 %.

Автор роботи [9] пропонує встановлення теплоізоляції у два шари теплоізоляційного матеріалу: перший шар – вкладається між Z-подібними профілями каркаса; другий шар вкладається поверх Z-подібних профілів і першого шару мінеральної вати, яка упакована в поліетиленову плівку.

На теперішній час широко застосовується тепловізійний аудит рухомого складу. Автором роботи [10] проведений тепловізійний аудит вагонів електропоїздів з урахуванням низки чинників. Подальший розвиток і впровадження тепловізійного аудиту вимагає розробки та впровадження енергетичного паспорта для кожного вагона електропоїзда та на електропоїзд у цілому.

В роботах [11, 12] авторами висвітлено процеси інфільтрації зовнішнього повітря, яке просякає у вагон через нещільності у дверях і кузовах, що збільшує витрати теплової енергії на підтримання комфортних умов у рухомому складі. Залежно від швидкості руху вагона обсяг інфільтрації [13] при зміні швидкості руху від 0 до 120 км/год досягає 325÷514 м³/год, при більш високих швидкостях інфільтрація буде ще значнішою.

У роботах, спрямованих на підвищення енергоефективності рухомого складу, не повністю висвітлено непродуктивні витрати для комбінованого електровугільного котла, а саме: при експлуатації електричного опалення, яке цілком залежить від обслуговуючого персоналу. Також в роботах не досліджується дія інфільтрації під час перестрою в пунктах формування і обороту пасажирських вагонів, вважається, що під час стоянки інфільтрації немає або вона незначна і тому не враховується. Фактично під час експлуатації протікають процеси інфільтрації, які не висвітлені і збільшують втрати теплової енергії пасажирських вагонів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою проведених досліджень є визначення можливостей зниження непродуктивних витрат теплової енергії пасажирськими вагонами в опалювальний період.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

1. Проведення тепловізійних вимірів для визначення місць теплових витрат у пасажирських вагонах.

2. На основі отриманих даних тепловізійної перевірки визначення заходів для їх подальшого усунення.

Основна частина дослідження. Під час експлуатації опалювальної системи пасажирського вагона обслуговуючий персонал (провідники) користуються «Інструкцією провіднику пасажирського вагона ЦЛ-0038», в якій є посилання на «Інструкцію з технічного обслуговування опалювальної установки пасажирського вагона ЦЛ-0024». У цих інструкціях не вказано, що обслуговуючий персонал при експлуатації опалювальної установки з комбінованим електровугільним котлом в режимі електричного опалення повинен закривати дверцята топки та зольника. Тому під час експлуатації опалювальних установок в комбінованому режимі обслуговуючий персонал у більшості випадків лишає дверцята топки і зольника відкритими, що сприяє вільному доступу холодного повітря до вогневої коробки комбінованого котла. За таких умов комбінований котел працює як дефлектор (рис. 1).

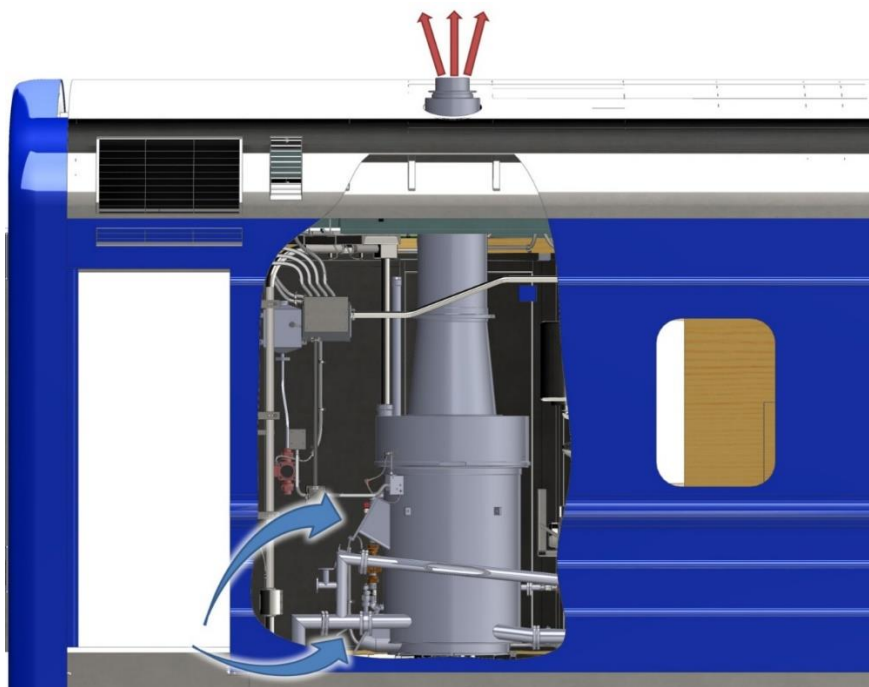


Рис. 1. Втрати теплової енергії під час експлуатації опалювальних установок у комбінованому режимі

Об'єм повітря, що проходить через котел можна обчислити за формулою

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \omega,$$

де d – діаметр димоходу, м;

ω – швидкість руху повітря через патрубков, ω залежить від швидкості руху вагона, м/с.

Результати розрахунків свідчать, що при відкритих дверцятах топки і зольника обсяг повітря, що проходить через котел, при швидкостях руху до 160 км/год може досягати 478 м³/год. Враховуючи, що теплоносій нагрітий і стінки вогневої коробки котла гарячі, холодне повітря, проходячи через котел, нагрівається і через димохід виходить у довкілля.

У даному випадку зниження витрат теплової енергії при опаленні пасажирського вагона досягається без витрат на модернізацію опалювальної установки, а лише внесенням відповідних змін до посадових інструкцій і доведенням до обслуговуючого персоналу цих змін.

Навесні 2018 року на базі пасажирських вагонів пасажирського вагонного депо Львів ПКВЧД-8 авторами були проведені тепловізійні виміри температурних полів зовнішньої сторони кузова пасажирського вагона. Увагу також було приділено дефлекторам для видалення відпрацьова-

ного повітря з вагона і забірним жалюзі зовнішнього повітря системи вентиляції.

Метою експериментальних вимірів було визначення місць теплових витрат у вагонах унаслідок дії інфільтрації зовнішнього повітря під час перестоя пасажирських вагонів для вдосконалення моделей теплового балансу пасажирських вагонів з подальшим коригуванням елементів конструкції і підвищенням енергоефективності систем опалення.

Виміри проводились в парку екіпірування:

- без впливу сонячної радіації, з 18 до 20 год;
- при зовнішній температурі +1°C й відносній вологості 70 %;
- температура всередині вагонів становила від +19 до +22°C;
- тепловізором «Testo 875-1» зав. № 1991253, діапазон вимірювання від -20 до 100°C; абсолютна похибка вимірювань становить ±2 % від вимірюваного значення.

Експериментальні виміри включали в себе вимірювання температурних полів зовнішньої сторони кузова пасажирського вагона, дефлекторів для видалення відпрацьованого повітря з вагона і забірних жалюзі зовнішнього повітря системи вентиляції. Виміри проводилися у п'яти купейних і п'яти плацкартних вагонах, теплограми вимірів окремих вагонів подано на рис. 2 і 3.

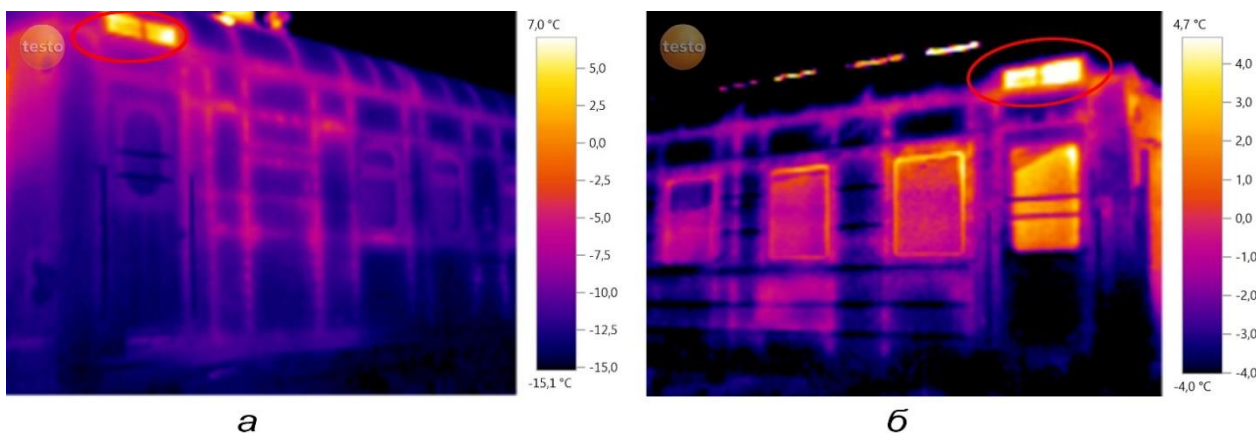


Рис. 2. Теплограми вимірів вагонів:
а, б – забірні жалюзі зовнішнього повітря системи вентиляції

Як видно з теплограм, які подано на рис. 2, спостерігаються втрати теплової енергії через забірні жалюзі системи вентиляції, а саме: повітря через повітроводи системи вентиляції виходить з вагона в зовнішнє середовище. Слід зазначити, що ситуація погіршується тим, що перед виходом в зовнішнє середовище повітря з температурою приміщення вагона проходить через водяний калорифер і догрівається до ще більшої температури.

Як видно з теплограм, які подано на рис. 3, тепле повітря через дефлектори для видалення відпрацьованого повітря виходить з вагона в зовнішнє середовище. Зазвичай це їхній штатний режим роботи, але як зазначено в роботі [14], у кузові пасажирського вагона виділено дві зони температурних полів з різними температурними режимами, які розділені декоративною стелею. Зони температурних полів під декоративною стелею мають вищу температуру повітря.

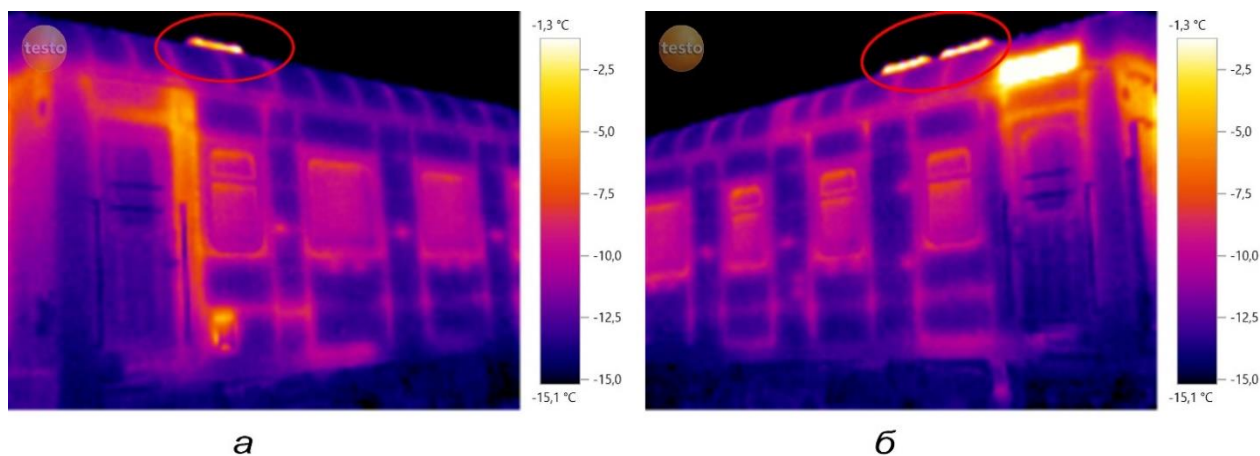


Рис. 3. Теплограми вимірів вагонів:
а, б – дефлектори для видалення відпрацьованого повітря

З метою підвищення енергоефективності систем водяного опалення для ліквідації або зниження втрат тепла через забірні жалюзі системи вентиляції авторами пропонується встановлення зворотного клапана з низьким опором в повітроводі перед калорифером за напрямком руху повітря при працюючій системі вентиляції. Таким чином при вимкненій системі вентиляції клапан буде закритий і запобігатиме втратам тепла через забірні жалюзі системи вентиляції.

Обговорення результатів дослідження підвищення енергоефективності. Результати досліджень показали, що внесення відповідних доповнень до експлуатаційної документації, а саме: «Інструкція провіднику пасажирського вагона ЦЛ–0038» та

«Інструкція з технічного обслуговування опалювальної установки пасажирського вагона», дозволить знизити непродуктивні витрати теплової енергії пасажирськими вагонами при експлуатації опалювальної установки з комбінованим електровугільним котлом в режимі електричного опалення.

За допомогою тепловізійних вимірів пасажирського рухомого складу виявлено непродуктивні витрати теплової енергії через забірні жалюзі системи вентиляції унаслідок дії інфільтрації зовнішнього повітря під час перестоя в пунктах формування і обороту пасажирських вагонів. Повітря з температурою приміщення вагона проходить через калорифер і догрівається до ще більшої температури та виходить в

зовнішнє середовище, тому витрати теплової енергії збільшуються.

Висновки. 1. Внесення відповідних змін до експлуатаційної документації і посадових інструкцій: «Інструкція провіднику пасажирського вагона ЦЛ–0038» та «Інструкція з технічного обслуговування опалювальної установки пасажирського вагона ЦЛ–0024» дозволить знизити непродуктивні витрати теплової енергії при експлуатації опалювальних установок з комбінованим електровугільним котлом в режимі електроплавлення.

2. Встановлення зворотного клапана з низьким опором в повітроводі дозволить знизити непродуктивні витрати теплової енергії, запропонована модернізація легко реалізується та не потребує значних інвестицій. Таку модернізацію можна проводити в умовах сучасних вагоноремонтних депо при проведенні капітально-відновлювальних ремонтів, також вона потребує врахування при проектуванні нових пасажирських вагонів.

Список використаних джерел

1. Остапчук В. Н., Залозных В. А., Подопригора А. И. Энергосбережение – современный путь развития железнодорожного транспорта. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* 2012. № 12. С. 22–28.
2. Фалендиш А. П., Володарець М. В., Артеменко О. В. Перспективи енергозбереження для електрофікованих транспортних засобів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* 2017. № 4. С. 215–218.
3. Vetterli N., Menti P., Sidler F., Thaler E., Zweife G. Energy efficiency of railway vehicles. *Future Buildings and Districts - Sustainability from Nano to Urban Scale: Proceedings of CISBAT 2015 International Conference, Lausanne, 9.09-11.09. 2015. Lausanne, Switzerland, 2015. P. 955–960.*
4. Sweeney E., Brunton J. Modification of Luas heating and ventilation systems to reduce energy consumption. *Irish Transport Research Network Conference: Trinity College Dublin, Dublin, Ireland, 5-6 September, 2013. URL:10.21427/16za-cg14.*
5. Китаев Б. Н., Рубинчик И. М., Гудыма У. В. Пути улучшения теплотехнических показателей пассажирских вагонов с кондиционированием воздуха при высоких скоростях движения. Москва: Транспорт, 1974. 72 с.
6. Испытание пассажирских вагонов железных дорог на теплоустойчивость / В. П. Клюка, А. П. Стариков, Д. Ю. Кузьменко, А. А. Попов. *Известия Транссиба.* 2015. № 2. С. 6–12.
7. Іщенко В. М., Фомін О. В., Осьмак В. Е. Теплотехнічна модель конструкції огороження кузова критого вагона з теплоізоляцією. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. № 157. С. 143–149.
8. Методологічно-інформаційні аспекти паспортизації спеціалізованих ізотермічних вагонів / В. М. Іщенко, Н. С. Брайковська, В. Є. Осьмак, Н. С. Кочешкова. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. Серія: Транспортні системи і технології.* 2016. № 29. С. 154–162.
9. Рахимов Р. В. Новый пассажирский вагон купейного типа для железных дорог Узбекистана. *Известия ПГУПС.* 2010. № 2. С. 315–330.
10. Sumtsov A., Falendysh A., Chygyryk N., Vasilenko O., Vyhopen I. Stock. Energy Saving for the Suburban Rolling. *International Journal of Engineering & Technology.* 2018. № 7. P. 361–365.
11. Кузина Л. Г. Влияние инфильтрации воздуха на тепловой баланс кабин машиниста и пассажирских салонов подвижного состава железных дорог: автореф. Дис. ... канд. Техн. Наук: 05.26.01. Москва, 1996. 23 с.

12. Теоретические основы раздельного определения показателей теплообмена при теплотехнических испытаниях крытых вагонов с теплоизоляцией / В. Н. Ищенко, М. Б. Кельрих, Н. С. Брайковская, В. Е. Осьмак. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп., присвячений 60-річчю кафедри «Вагони»*. 2013. № 139. С. 35–40.

13. Гудыма Е. В. Повышение эффективности вентиляционных систем пассажирских вагонов. *Вестник ВНИИЖТ*. 1988. № 7. С. 42–46.

14. Білошицький Е. В. Енергоефективність систем життєзабезпечення рухомого складу залізниць. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2018. № 179. С. 13–25. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.179.2018.147709>.

Білошицький Едуард Васильович, інженер-конструктор, канд. Техн. Наук, ТОВ «ШКОДА ТРАНСПОРТЕЙШН УКРАЇНА». Тел.: +38-067-910-23-04. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com, ORCID iD: 0000-0002-2424-8479.

Ловська Альона Олександрівна, канд. Техн. Наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-35.

E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-8604-1764.

Мямлін Сергій Сергійович, здобувач, науковий співробітник проектно-конструкторського технологічного бюро Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Тел.: +38-096-135-68-84. E-mail: sergeymyamin91@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-9204-4435.

Biloshytskyi Eduard engineering constructor, PhD (Tech.) «SKODA TRANSPORTATION UKRAINE LLC». Tel.: +38-067-910-23-04. E-mail: e.beloshickiy@gmail.com. ORCID 0000-0002-2424-8479.

Lovska Alyona Oleksandrivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Wagons Engineering and Quality Production, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-35.

E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-8604-1764.

Myamin Sergiy, applicant, Researcher of Design Technology Bureau Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan. Tel.: +38-096-135-68-84. E-mail: sergeymyamin91@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-9204-4435.

Статтю прийнято 01.12.2020 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.223.2

СПРОЩЕНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄКТА МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ ДЛЯ РОЗРОБКИ ЗАХОДІВ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Асист. О. В. Кірицева, кандидати техн. наук О. В. Клецька, А. О. Лямзін,
д-р техн. наук А. П. Фалендиш

SIMPLIFIED APPROACH OF DETERMINATION OF THE MEASURE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF RAILWAY TRANSPORT OF THE METALLURGICAL PLANT

Assistant O. V. Kiritseva, PhD (Tech.) O. V. Kletska, PhD (Tech.) A. O. Lyamzin,
D. Sc. (Tech.) A.P. Falendysh

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230093>

***Анотація.** У статті запропоновано підхід до визначення заходу з підвищення ефективності роботи залізничного транспорту металургійного комбінату. Він базується на підходах науки управління та методів лінійного програмування. Алгоритм визначення раціонального засобу розподілу дефіцитних ресурсів за наявності конкуруючих потреб передбачає п'ять етапів розрахунків. На основі цього підходу визначено заходи з підвищення ефективності роботи залізничного транспорту металургійного комбінату. Для цього розглянуто роботу залізничного цеху металургійного підприємства, а саме, визначено оберт вантажних вагонів різних власників та час їх перебування на заводських коліях.*

***Ключові слова:** вантажні операції, оберт вагона, модель науки управління, модель лінійного програмування.*

***Abstract.** The article proposes the approach for determining the measure to increase the efficiency of railway transport of the metallurgical plant. The analysis of scientific and normative works on the efficiency of railway transport at industrial enterprises showed that this issue is not fully covered and requires more detailed study.*

The work of the railway shop of the metallurgical enterprise is considered, namely, the turnover off right cars of different owners and the time of their stay on the factory tracks are determined. An analysis of statistical data was made, which showed that the time difference between the standard set at the enterprise and the actual time of stay of the freight car at the plant has a large discrepancy. This requires spending additional funds for the use of cars of different owners.

For this purpose, a model for determining measures to minimize costs at the metallurgical enterprise was developed. The algorithm for its solution involves five stages of calculations. It is based on the model of managements science, which is presented as the approach of linear programming to determine the optimal means of allocating scarce resources in the presence of competing needs.

Calculations were made, thanks to which the first stage of development of the model for determining the measure to improve the performance of railway transport was performed and the indicators that characterize it were determined.

The total time of rolling stock at the enterprise is determined. Based on this, it is established that it is necessary to separate from the total time the time spent at each station according to the operations performed with the cars. Costs are determined operationally due to the received analysis of the stay and turnover of the freight car at the metallurgical enterprise.

Installed stations, which are the most time-consuming freight cars, is there is an excess of payment for the down time of cars at these stations. Based on this, it was decided that it is necessary to study in more detail the operations performed with cars at these stations and to identify "weaknesses" in the turnover of the freight car at the metallurgical enterprise.

Keywords: freight operations, car rotation, model of control science, model of linear programming.

Вступ. Вагомою ланкою технологічного процесу металургійного виробництва є організаційна система вагонопотоків. Дійсна система організації вагонопотоків ґрунтується на засадах планової економіки за умов монотонного й постійного зростання вагонопотоків. При цьому спрацьовує концепція плану формування потягів. Проте сьогодні з послідовним набуттям українською економікою ринкових ознак, під впливом численних внутрішніх і зовнішніх чинників існуюча система діє в межах коливань вагонопотоків. Аналіз часових показників обсягів перевезень довів, що вони є фактично не прогнозованими. Це приводить до падіння ефективності роботи системи організації вагонопотоків через відсутність діючих механізмів пристосування до змін обсягів вагонопотоків на сортувальних станціях металургійного комбінату.

Дослідження елементів обертуючих вагонів на підприємстві доводить, що більше ніж у 50 % випадків вагони простоюють на коліях металургійного підприємства понад нормативний час, який відведено для перебування вагонів на підприємстві. Через це постійно відбувається прострочення часу доставки вантажу, можливий фінансовий ризик (виплата штрафу), збільшення плати за користування вагонів різних операторів на коліях металургійного комбінату. Саме тому основною проблемою є виявлення причин та ризиків, які призводять до цих наслідків. Тому існує

проблема мінімізації витрат металургійного комбінату, які сплачуються за перебування вантажних вагонів різних операторів на його коліях.

Предметом дослідження в роботі є методи та моделі визначення об'єкта металургійного комбінату для підвищення ефективності роботи його залізничного транспорту.

Об'єктом дослідження є робота залізничного транспорту металургійного комбінату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності функціонування промислового транспорту є актуальною і важливою проблемою повсякдень. Цьому питанню приділяли значну увагу вчені Приазовського державного технічного університету під керівництвом В. Е. Парунакяна та В. К. Губенка. У своїх роботах вони розглядали питання організації і технології роботи промислового залізничного транспорту металургійного виробництва у транспортно-вантажному комплексі вивантаження металопродукції на основі логістики та економічних показників з транспортного процесу [1, 2]. Ними запропоновано використовувати вагоно-операцію як вимірник транспортної роботи для умов промислового транспорту.

Загальні принципи будови та методи вирішення багатьох завдань управління на магістральних залізницях України, які відображають специфічні особливості взаємодії з промисловим залізничним транспортом, досліджено у роботах

І. М. Мілецької [3] та Т. В. Бутько з Українського державного університету залізничного транспорту [4]. Також у роботах Т. В. Бутько і О. Е. Шандера сформовано математичну модель, яка формалізує технологічний процес управління парком вантажних вагонів операторських компаній у вигляді оптимізаційної задачі з цільовою функцією, яку надано у вигляді сумарних експлуатаційних витрат за період планування, та системи обмежень технічних і технологічних умов [5]. У праці [6] запропоновано програмне забезпечення, яке дає змогу отримувати рішення у формі оперативного плану. Цей план забезпечує синхронізацію процесу перевезення для залізничної мережевої підсистеми, яка має складну топологію.

У роботах Д. М. Козаченко з Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна наведено описання імітаційної моделі залізничної станції, що дає змогу визначити її техніко-експлуатаційні показники. Подано програмний комплекс, який забезпечує підготовку вихідних даних для моделювання в автоматизованому режимі та виконує моделювання роботи станції під управлінням людини [7].

Питаннями експлуатаційно-технічних показників технологічних перевезень металургійного підприємства, виконаних за контактними (організаційними) графіками та відмічених необхідністю переходу на більш ефективні форми взаємодії виробництва і транспорту, займалися А. Т. Попов [8, 9] та О. В. Вороніна з Липецького державного технічного університету [10].

Проте наукових праць щодо спрощеного вибору заходу з підвищення ефективності роботи залізничного транспорту металургійного комбінату, який враховував би особливості конкретного комбінату, недостатньо.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є розробка підходу до визначення об'єкта

металургійного комбінату для розробки заходів із мінімізації витрат на оберт вагона, який знаходиться на ньому.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз наукових та нормативних праць щодо ефективності роботи залізничного транспорту на промислових підприємствах;

- розробити спрощений алгоритм визначення об'єкта металургійного комбінату для розробки заходів із підвищення ефективності роботи залізничного транспорту;

- визначити загальний час перебування рухомого складу на підприємстві та відокремити його по кожній станції згідно з операціями, які виконуються з вагонами;

- визначити витрати поопераційно виходячи з отриманого аналізу перебування та оборту вантажного вагона на металургійному підприємстві;

- визначити найбільш збитковий об'єкт металургійного комбінату та запропонувати заходи з підвищення ефективності роботи його залізничного транспорту.

Основна частина дослідження. На металургійному комбінаті, як показує практика, вагони перебувають понад нормативний час, що призводить до збільшення плати за їх використання, а також до нарахування штрафних санкцій за несвоєчасне виконання умов договору. Все це у свою чергу позначається на економічних показниках підприємства, підвищує собівартість його продукції та знижує прибуток, чим значно погіршує його конкурентоспроможність. При цьому частка транспортних та логістичних витрат у вартості готової продукції підприємства висока.

Усе це вказує на те, що система з організації експлуатаційної роботи залізничного рухомого складу, яка існує зараз на підприємстві, малоефективна і потребує оптимізації на основі запропонованих заходів [11]. Але перш ніж впроваджувати будь-який захід, необхідно його вибрати та обґрунтувати.

Для пошуку ефективного методу розв'язання завдання підвищення ефективності роботи залізничного транспорту промислових підприємств шляхом визначення найбільш затратного об'єкта комбінату був зроблений аналіз, який показав, що існує багато підходів для його вирішення. Це використання методів штучних нейронних мереж, методів теорії графів, спеціального евристичного алгоритму, NSGA-III та інших, які потребують великої кількості інформації за тривалий період роботи. Але через обмеженість вихідних даних, які можна

отримати на підприємстві, для визначення об'єкта для розробки заходу з підвищення ефективності роботи залізничного транспорту пропонується наступний спрощений підхід.

На першому етапі розрахунків складається модель операцій, які виконуються з рухомим складом за час його перебування на коліях металургійного комбінату, та визначаються основні показники, що його характеризують [12].

Розглянемо металургійний комбінат, схему залізничних сполучень якого подано на рис. 1.

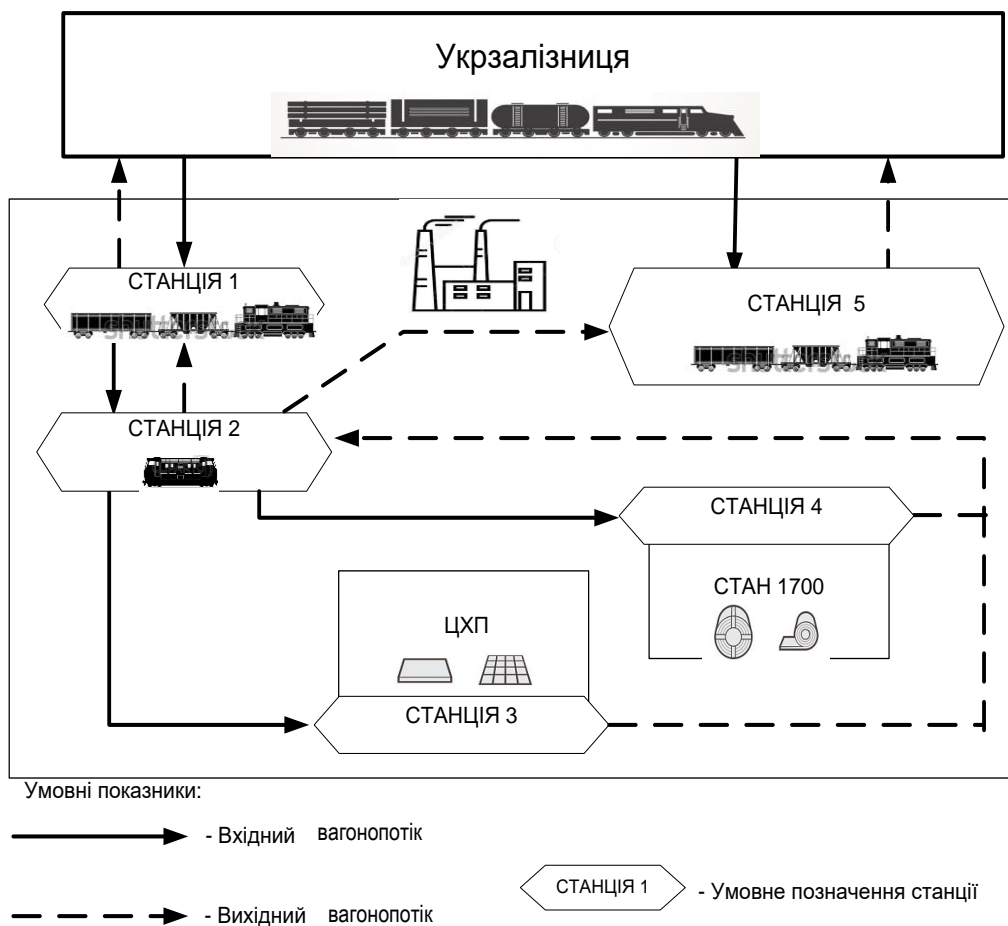


Рис. 1. Схема залізничних сполучень металургійного комбінату

Оскільки масиви інформації, які можуть бути отримані від комбінату, являють собою лінійні залежності, то поставлене завдання можна вирішити з

використанням підходів науки управління та методів лінійного програмування. Завдяки їм можливо визначення раціонального засобу розподілу дефіцитних

ресурсів при наявності конкуруючих потреб. У даному випадку як розподіл дефіцитних ресурсів виступають існуючі операції, які виконуються з рухомих складом або окремо з вантажним вагоном за час обертів на коліях металургійного підприємства та витрат на ці операції. Необхідно враховувати, що, згідно з договором між промисловими підприємствами та Укрзалізницею, час перебування рухомого складу Укрзалізниці на підприємстві за нормативом становить $T_{норм}$.

На другому етапі визначаємо час перебування рухомого складу на металургійному комбінаті. Загальний час його перебування τ на підприємстві можна визначити за формулою, хв,

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5, \quad (1)$$

де τ_1 – час, витрачений на операції з рухомих складом на станції 1, хв;

τ_2 – час, витрачений на операції з рухомих складом на станції 2, хв;

τ_3 – час, витрачений на вантажні операції у цехах вальцівки, хв;

τ_4 – час, витрачений на операції з рухомих складом у цехах вальцівки, хв;

τ_5 – час, витрачений на операції з рухомих складом на станції 5, хв.

Час, який витрачено на обробку рухомого складу по станції 1, визначаємо за формулою, хв,

$$\tau_1 = \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{14} + \tau_{15} + \tau_{16} + \tau_{17} + \tau_{18} + \tau_{19} + \tau_{1.10} + \tau_{1.11} + \tau_{1.12} + \tau_{1.13} + \tau_{1.14} + \tau_{1.15} + \tau_{1.16} + \tau_{1.17} + \tau_{1.18} + \tau_{1.19} + \tau_{1.20} + \tau_{1.21}, \quad (2)$$

де τ_{11} – час прибуття рухомого складу на станцію 1, хв;

τ_{12} – час обробки вагонниками рухомого складу, хв;

τ_{13} – час технічної обробки, хв;

τ_{14} – час відчеплення локомотива Укрзалізниці, хв;

τ_{15} – час причеплення місцевого локомотива металургійного комбінату, хв;

τ_{16} – час насування на вагоноперекидач, хв;

τ_{17} – час відчеплення локомотива, хв;

τ_{18} – час розгальмування та розчеплення кожного вагона, хв;

τ_{19} – час заїзду під вагони вагоноштовхача, хв;

$\tau_{1.10}$ – час подачі на вагоноперекидач, хв;

$\tau_{1.11}$ – час на розвантаження, хв;

$\tau_{1.12}$ – час після розвантаження вагона, який спрямовується у підгірку вагоноперекидача, хв;

$\tau_{1.13}$ – час обробки розвантажених вагонів вагонниками, хв;

$\tau_{1.14}$ – час заїзду локомотива, хв;

$\tau_{1.15}$ – час на затягування рухомого складу на колії очищування, хв;

$\tau_{1.16}$ – час на спорожнення порожніх вагонів, хв;

$\tau_{1.17}$ – час на заїзд тепловоза, хв;

$\tau_{1.18}$ – час на виштовхування вагонів локомотивом до сортувального парку, хв;

$\tau_{1.19}$ – час на відчеплення локомотива від рухомого складу, хв;

$\tau_{1.20}$ – час на заїзд другого тепловоза під рухомий склад, хв;

$\tau_{1.21}$ – час на заїзд тепловоза під рухомий склад та рух потяга на станцію 2, хв.

Час, який витрачено на обробку рухомого складу по станції 2, визначаємо за формулою, хв,

$$\tau_2 = \tau_{21} + \tau_{22} + \tau_{23} + \tau_{24}, \quad (3)$$

де τ_{21} – час на обробку потяга після прибуття на станцію 2, хв;

τ_{22} – час на відчеплення локомотива, хв;

τ_{23} – час на сортування вагонів за заявкою вальцівних цехів та формування подач, хв;

τ_{24} – час на заїзд тепловоза станції 3 та переміщення вагонів на станцію вальцівки, хв.

Час, який витрачено на обробку рухомого складу по станції 3, визначаємо за формулою, хв,

$$\tau_3 = \tau_{31} + \tau_{32} + \tau_{33} + \tau_{34} + \tau_{35}, \quad (4)$$

де τ_{31} – час на розстановку на колії навантаження у цеху, хв;

τ_{32} – час на оформлення документів після прибуття у цехи, хв;

τ_{33} – час очікування навантаження, хв;

τ_{34} – час навантаження, хв;

τ_{35} – час на оформлення документів на відправлення у цехах.

Час, який витрачено на обробку рухомого складу по станції 4, визначаємо за формулою, хв,

$$\tau_4 = \tau_{41} + \tau_{42} + \tau_{43} + \tau_{44} + \tau_{45} + \tau_{46} + \tau_{47} + \tau_{48} + \tau_{49} + \tau_{4.10}, \quad (5)$$

де τ_{41} – час на обробку рухомого складу після прибуття у цехи вальцівки, хв;

τ_{42} – час очікування подачі вагонів на вантажні fronti, хв;

τ_{43} – час, використаний на подачу вагонів, хв;

τ_{44} – час на розстановку вагонів на вантажні fronti, хв;

τ_{45} – час очікування забору вагонів з вантажних фронтів у цехах вальцівки, хв;

τ_{46} – час забору вагонів з вантажних фронтів у цехах вальцівки, хв;

τ_{47} – час накопичення вагонів на коліях у приймально-відправному парку, хв;

τ_{48} – час обробки рухомого складу, хв;

τ_{49} – час очікування відправлення потяга на станції 5, хв;

$\tau_{4.10}$ – час на відправлення потяга зі станції 2, хв.

Час, який витрачено на обробку рухомого складу по станції 5, визначаємо за формулою, хв,

$$\tau_5 = \tau_{51} + \tau_{52} + \tau_{53} + \tau_{54} + \tau_{55}, \quad (6)$$

де τ_{51} – час прибуття потяга на станцію 5, хв;

τ_{52} – час на відчеплення локомотива, хв;

τ_{53} – час на обробку вагонів вантажниками, хв;

τ_{54} – час на обробку вагонів вагонниками, хв;

τ_{55} – час насування локомотивом Укрзалізниці, хв.

Другим важливим показником є витрати на операції (С), які виконуються з вагонами на комбінаті. Визначення цих витрат виконується на третьому етапі і розрахунки виконуються за формулою, грн,

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (7)$$

де C_1 – витрати за користування на обробку вагонів на станції 1, грн;

C_2 – витрати за користування вагонами на станції 2, грн;

C_3 – витрати за користування вагонами у цехах вальцівки, грн;

C_4 – витрати за користування вагонами, які закріпленні за цехом управління залізничним транспортом у цехах вальцівки, грн;

C_5 – витрати за користування вагонами, які формуються у потяг за відправленням на станцію 5, грн.

Витрати за кожним цехом визначаються за такими формулами, грн,

$$C_1 = C_{\epsilon 1} * n_{\text{вагонів}}, \quad (8)$$

$$C_2 = C_{\epsilon 2} * n_{\text{вагонів}}, \quad (9)$$

$$C_3 = C_{\epsilon 3} * n_{\text{вагонів}}, \quad (10)$$

$$C_4 = C_{\epsilon 4} * n_{\text{вагонів}}, \quad (11)$$

$$C_5 = C_{\epsilon 5} * n_{\text{вагонів}}. \quad (12)$$

де $C_{\epsilon 1} \dots C_{\epsilon n}$ – витрати на операції за одним вагоном на відповідній станції, грн.

На четвертому етапі пропонується використовувати питомий коефіцієнт, який являє собою часові витрати на операції, що виконуються з вагонами на комбінаті (τ) та розраховуються за формулою, умов. од.:

$$C_{\tau i} = \frac{\tau_i}{C_i}. \quad (13)$$

Розроблений підхід реалізований на одному із найбільших промислових підприємств Приазов'я. Був зібраний статистичний масив даних щодо роботи підприємства за два роки. На основі оброблених даних була побудована діаграма порівняльного аналізу фактичного та нормативного часу перебування вагонів на виробничому комбінаті (рис. 2).

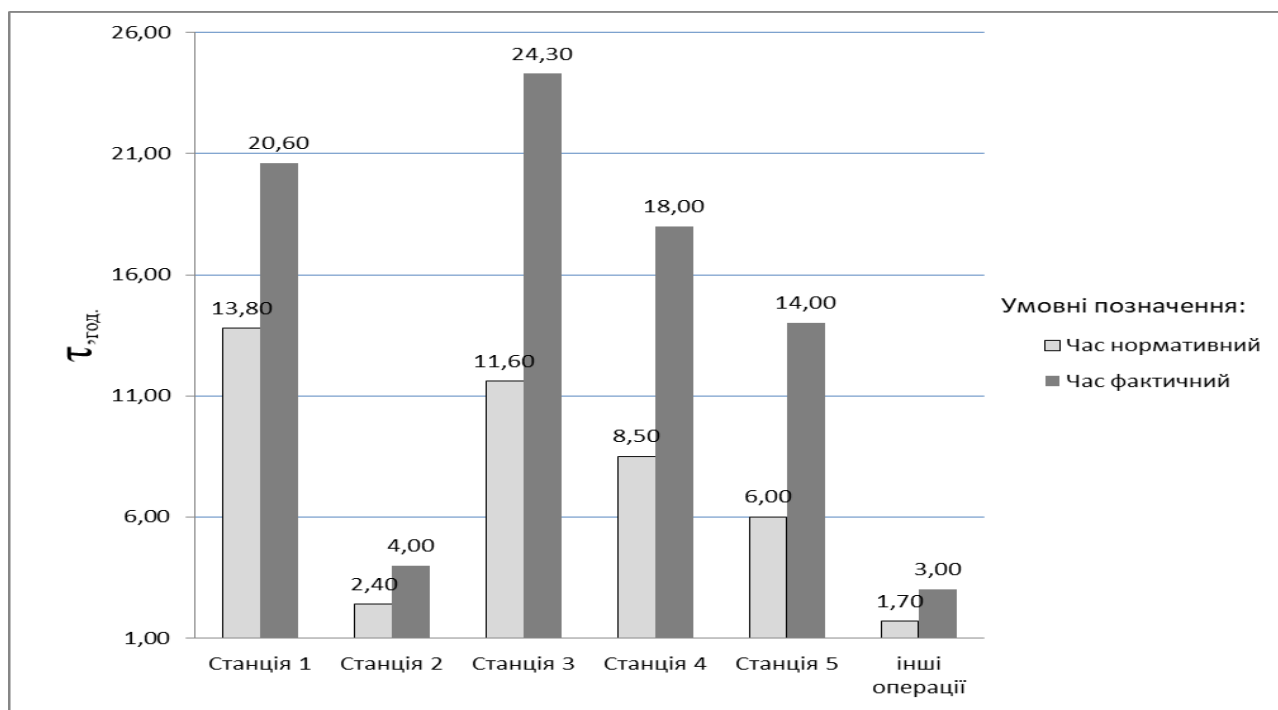


Рис. 2. Діаграма порівняльного аналізу фактичного та нормативного часу перебування вагонів на виробничому комбінаті

На даній діаграмі подано часові показники у часовому співвідношенні

перебування вагонів за певними операціями, згідно з нормативом, закріпленим

підприємством, та фактичні часові показники.

Так, на основі зібраних статистичних даних було зроблено аналіз перебування та обертів вантажного вагона на металургійному підприємстві. Він показав, що приблизно 42 % від загального часу обертів вагона становить перебування його на станціях виконання вантажних операцій (станція 1, станція 3, станція 4). Також до 50 % зазначеного часу вагони магістрального транспорту перебувають на коліях станцій прибуття та відправлення.

На основі оброблених даних була побудована діаграма порівняльного аналізу фактичних та нормативних витрат за перебуванням вагонів на металургійному комбінаті, зображених в умовних одиницях (рис. 3).

Таким чином, діаграма відображає витрати по кожній станції. На підставі цього можна зробити висновок, що найбільші витрати припадають на станції 1, 3 та 4.

Зробивши поелементний аналіз, можна узагальнити отримані результати за часовими відхиленнями та витратами на ці відхилення від норми (таблиця).

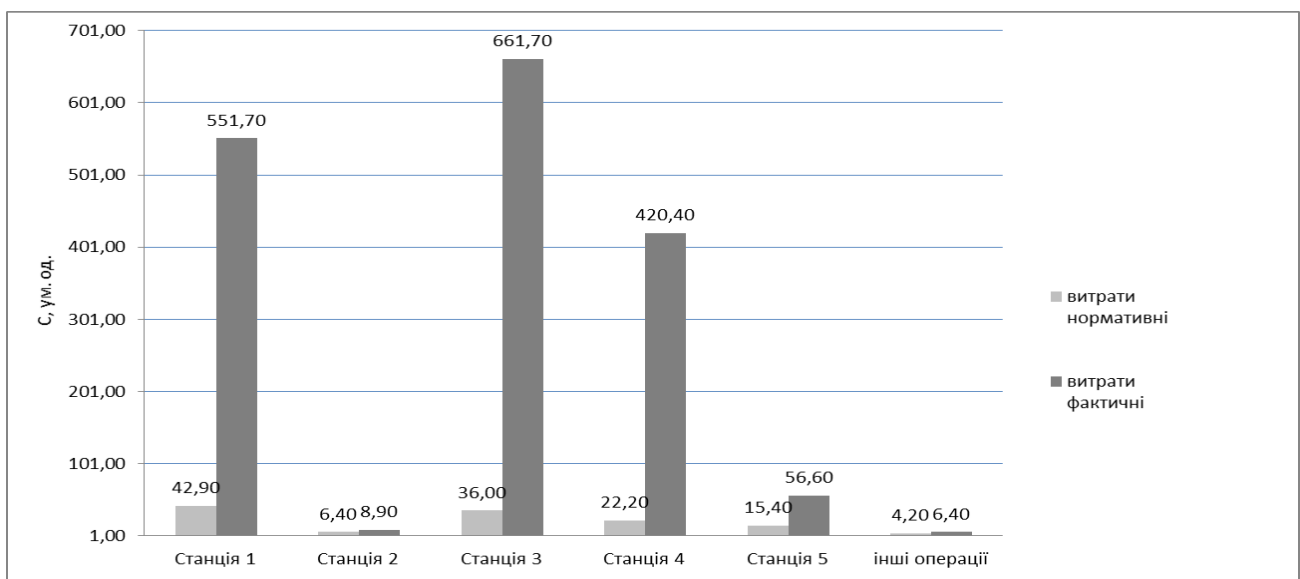


Рис. 3. Діаграма порівняльного аналізу фактичних та нормативних витрат за вагон

Таблиця

Показники перебування вагонів за часом та витратами поелементно

Найменування станцій	τ_i , год	C_i , умов. од.	$C_f - C_n$, умов. од.	C_i/τ_i
Станція 1	26,6	551,7	508,8	20,74
Станція 2	4,0	89,0	2,5	22,25
Станція 3	28,0	714,4	625,7	25,51
Станція 4	24,0	661,7	398,2	27,57
Станція 5	8,0	100,2	41,2	12,52
Інші операції	3,0	6,4	2,2	2,1

Як показують дані, середні простой вагонів коливаються залежно від станції, на

якій вони перебувають. Були розраховані питомі показники по кожній станції. Із

таблиці видно, що найбільші питомі витрати припадають на станцію 3 та станцію 4.

Поставлене у статті завдання було вирішено із застосуванням сучасних методів математичного моделювання. Виконані дослідження функціонування залізничного промислового транспорту базуються на процедурі аналізу зібраних статистичних даних залізничних перевезень і математичної статистики.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів базуються на правильному використанні методів математичної статистики під час обробки статистичної інформації при виконанні аналізу основних експлуатаційних показників роботи вантажних станцій комбінату.

Проведений аналіз дає підставу вважати, що необхідно детальніше вивчати операції, які виконуються з вагонами на цих станціях, та виявляти «вузькі або слабкі» місця в оборті вантажного вагона.

Узагальнено можна сформулювати причини, які впливають на дану ситуацію. До них можна віднести: невідповідність існуючої технології на підприємстві, технічного оснащення залізничного транспорту; організація взаємодії з магістральним транспортом, яка продиктована новими ринковими умовами роботи з рухомим складом приватних операторів.

Розробка необхідних заходів буде сприяти виявленню факторів, які впливають на перепростой вагонів, оцінюванню ступеня їх впливу та побудові функціональних залежностей тривалості операцій від факторів, які піддаються управлінню, регулюванню або іншому впливу тощо [13].

У результаті експертного аналізу пропонуються такі основні заходи, які направлені на підвищення ефективності роботи залізничного транспорту комбінату:

- для станції 1 необхідна наявність вільних колій у приймально-відправному парку, наявність вільних колій у сортувальному парку, наявність додаткового

локомотива, зменшення часу на обробку сертифікатів та проведення митного огляду;

- для станцій 3, 4 необхідно виключити подачу неочищених вагонів з інших станцій для навантаження готовою продукцією; розподіляти процес відвантаження готової продукції на декілька видів операцій, враховуючи їх різноманітність та специфіку; наявність додаткового маневрового локомотива.

Висновки

1. Зроблено аналіз робіт провідних спеціалістів, який показав, що дане питання освітлено неповністю та потребує детальнішого розгляду.

2. Розроблений підхід до визначення об'єкта металургійного комбінату для розробки заходів із підвищення ефективності роботи залізничного транспорту.

3. Складено модель операцій, які виконуються з рухомим складом за час перебування на металургійному підприємстві. Визначено основні показники, які його характеризують.

4. Визначено та проаналізовано загальний час перебування вагона на комбінаті. Розглянуто час поопераційно на кожній станції окремо. Порівняльний аналіз часу між нормативом, закріпленим на підприємстві, та фактичним показником дав змогу встановити, що приблизно 42 % від загального часу оборту вагона становить перебування його на станціях виконання вантажних операцій (станція 1, станція 3, станція 4). Встановлено, що до 50 % зазначеного часу вагони магістрального транспорту перебувають на коліях станцій прибуття та відправлення.

5. Визначено загальні витрати за перебування вагона на підприємстві. Загальні витрати за вагон розглянуто поопераційно на кожній станції. Зроблено порівняльний аналіз нормативної та фактичної плати за використання вагонів. Він показав, що приблизно найбільші витрати припадають на цехи вальцівки, які складають приблизно 60 % від загальних витрат за вагон. Таким чином, проведений

аналіз дає підставу вважати, що необхідно детальніше розглядати операції, які виконуються з вагонами на цих станціях, та виявляти «слабкі» місця в оберті вантажного вагона.

6. Визначили об'єкт металургійного комбінату, який впливає на зменшення ефективності роботи залізничного транспорту. Встановили, що найбільші витрати, які пов'язані з перепростоями вагонів понад норматив, виявлені на

станціях 3 та 4. Одним із ефективних способів зниження витрат за користування вагонами є скорочення часових простоїв між операціями, які виконуються на вантажних станціях.

7. У подальшому необхідно розробити моделі та методи, які визначають оптимальну систему управління розподілу вагонів і локомотивів під вантажно-розвантажувальними операціями.

Список використаних джерел

1. Губенко В. К., Парунакян В. Э. Общий курс промышленного транспорта: учеб. для вузов. Москва: Транспорт, 1994. 199 с.
2. Парунакян В. Э., Бойко В. А. Методика оценки перерабатывающей мощности грузовой железнодорожной станции промышленного предприятия. Ч. 1. *Вісник Приаз. держ. техн. унів.*: зб. наук. праць. Маріуполь, 2007. Вип. 17. С. 193–197.
3. Мілецька І. М. Дослідження показників вантажної роботи на місцях незагального користування в умовах підприємства Д. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2010. Вип. 118. С. 220–225.
4. Бутько Т. В., Ляшко О. В. Формалізація технології роботи залізничної станції з під'їзною колією на основі методів логістики. *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп.* Харків: УкрДАЗТ, 2012. Вип. 133. С. 63–69.
5. Бутько Т. В., Шандер О. Е. Формалізація процесу управління парком вантажних вагонів операторських компаній. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 2(3). С. 55–58.
6. Butko T., Prokhorov V., Kalashnikova T., Riabushka Y. Procedia Organization of railway freight short-haul transportation on the basis of logistic approaches. *Computer Science*. 2019. 149. P. 102–109.
7. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Коробйова Р. Г. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіка. *Залізничний транспорт України*. 2008. № 4. С. 18–20.
8. Попов А. Т. Оптимизация взаимодействия технологического железнодорожного транспорта и производства: (на примере металлургического комбината: дис... канд. техн. наук: 05.22.12 / Попов Алексей Тимофеевич. Москва, 1984. 235 с.
9. Попов А. Т., Котова И. В. Оптимизация структуры парка подвижного состава для отгрузки металлопродукции в условиях динамики производства и оборота вагонов по внешней сети. *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2011. № 1. С. 75–81.
10. Попов А. Т., Воронина О. В. Проблемы существующей организации внутривозовских перевозок в условиях металлургического комбината. *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2014. № 5. С. 29–37.
11. Кирицева Е. В., Маслак А. В. Исследование процесса переработки вагонопотоков районной станции металлургического предприятия. *Вісник Приаз. держ. техн. ун-ту*. Серія: Технічні науки: зб. наук. праць. 2015. Вип. 31. С. 221–227.
12. Кіріцева О. В., Клецька О. В., Тимофеенко М. Ю. Спрощена модель визначення слабких місць вагонопотоків металургійного комбінату. 11 Міжнародна науково-практична

конференція: Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2020. С. 309–311.

13. Кіріцева О. В., Клецька О. В., Новак Г. Л. Підхід до визначення ефективних заходів підвищення якості роботи залізничного транспорту металургійного підприємства. Міжнародна науково-практична конференція: Енергоефективність на транспорті (18-20 листопада 2020 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 23–25.

Кіріцева Олена Вікторівна, асистент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-5883>. Тел.: 0672894661. E-mail: evkiritseva@gmail.com.

Клецька Ольга Віталіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4682-860X>. Тел.: 0957466579. E-mail: gurao@ukr.net.

Лямзін Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології міжнародних перевезень і логістики ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6964-845X>. Тел.: 0961330839. E-mail: alyamzin7791@gmail.com.

Фалендиш Анатолій Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри транспортних технологій підприємств ДВНЗ Приазовського державного технічного університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3602-7945>. Тел.: 0503032039. E-mail: fap_hiit@ukr.net.

Kiritseva Elena, assistant Professor of transport technologies of the enterprises of state University Pryazovskyi state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-5883>. Phone: 0672894661. E-mail: evkiritseva@gmail.com.

Kletska Olha, PhD (Tech), associate Professor of the Department of transport technologies of enterprises of the Azov state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4682-860X>. Phone: 0957466579. E-mail: gurao@ukr.net.

Lyamzin Andrey, PhD (Tech), associate Professor of the Department of transport technologies of enterprises of the Azov state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6964-845X>. Phone: 0961330839. E-mail: alyamzin7791@gmail.com.

Falendysh Anatoliy, Dr. Sc. (Tech), Professor of the Department of transport technologies of enterprises of the Pryazovsky state technical University. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3602-7945>. Phone: 0503032039. E-mail: fap_hiit@ukr.net.

Статтю прийнято 20.11.2020 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.4.015: 681.51

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЧЕТЫРЕХОСНОГО АВТОНОМНОГО ТЯГОВОГО
МОДУЛЯ**

Ф. Буреш

**MATHEMATICAL MODEL OF SPATIAL OSCILLATIONS OF A RAILWAY FOUR-
AXLE AUTONOMOUS TRACTION MODULE**

František Bures

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230168>

***Аннотация.** В статье автором предложено описание оригинальной математической модели пространственных колебаний четырехосного автономного тягового модуля при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам железнодорожного пути. При этом конструкция четырехосного автономного тягового модуля представлена как сложная механическая система, а путь рассматривается как упруго-вязкая инерционная система. Разработанная автором математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений 100-го порядка. В модели учитываются силы в связях между телами системы и пространственные перемещения твердых тел механической системы с учетом возможных ограничений. Данная математическая модель является базовой для проведения дальнейших теоретических исследований динамики железнодорожных четырехосных автономных тяговых модулей при одиночном движении или при движении в составе поезда.*

***Ключевые слова:** автономный тяговый модуль, динамическая нагруженность, моделирование колебаний, динамические качества движения, транспортная механика.*

***Abstract.** A description of the original mathematical model of spatial oscillations of a four-axle autonomous traction module during its movement along straight and curved sections of the railway track is proposed. In this case, the design of a four-axle autonomous traction module is presented as a complex mechanical system, and the track is considered as an elastic-viscous inertial system. The equations of motion were compiled using the Lagrange method of the II kind. For each of the solids, the kinetic energy is determined by the Koenig theorem. The potential energy component is obtained by the Clapeyron theorem, as the sum of the energies accumulated in the elastic elements of the system during their deformations. The dissipative energy was also taken into account when compiling the equations of motion. Generalized forces that have no potential, in this case, include the forces of interaction between wheels and rails, which are determined using the creep hypothesis.*

It is important to note that the model takes into account the forces in the bonds between the bodies of the system and the spatial displacements of the rigid bodies of the mechanical system, taking into account possible restrictions.

Moreover, the mathematical model developed by the author is a system of differential equations of the 100th order.

This mathematical model is the base for further theoretical studies of the dynamics of railway four-axle autonomous traction modules in single motion or when moving as part of a train.

To solve the resulting system of differential equations, the author develops special software that allows for complex theoretical studies of spatial oscillations of a four-axle autonomous traction module to determine the indicators of its dynamic loading and traffic safety.

Key words: *autonomous traction module, dynamic loading, vibration simulation, dynamic motion qualities, transport mechanics.*

Вступление. Обеспечение эффективности эксплуатации железнодорожного транспорта, как ведущей отрасли транспортной системы, требует внедрения современного подвижного состава. При этом особое внимание следует уделять рельсовым экипажам. При разработке новых конструкций рельсовых экипажей важное значение имеет оценка динамических качеств создаваемого транспортного средства и определение показателей безопасности движения. Особенно это актуально для тяговых рельсовых экипажей. В связи с этим важным является учет на стадии проектирования рельсовых экипажей уточненных динамических нагрузок, которые действуют на них в эксплуатации. Это вызывает необходимость создания уточненных математических моделей для определения динамических нагрузок, действующих на рельсовые экипажи в условиях эксплуатации.

Анализ последних исследований. Как правило, исследователями оценка динамических качеств рельсовых экипажей, как самоходных, так и несамоходных, производится с использованием математических моделей, которые учитывают основные конструктивные особенности рельсового экипажа [1, 2], его массовые и инерционные характеристики. Однако при этом важным является учет его движения не только в прямых участках пути, но и в кривых.

Для уточненной оценки динамических качеств рельсовых экипажей в работах [3, 4] учитываются типы связей между элементами конструкции. При этом чаще всего используются упругие, упруго-фрикционные или вязкие связи.

Необходимо отметить, что во внимание следует принимать перемещения рельсовых экипажей не только в плоской системе координат, а и в пространственной.

В работах [5, 6] освещаются особенности создания математических моделей перемещений рельсовых экипажей. При этом движение рельсовых экипажей рассматривается в вертикальной и продольной плоскостях. Составление математических моделей их движения осуществляется с использованием метода Лагранжа II рода. Важно отметить, что для более точной оценки динамических качеств рельсовых экипажей необходимым является использование более современных методов и средств решений математических моделей их перемещений.

При математическом моделировании перемещений тяговых рельсовых экипажей необходимо также учитывать конструктивное расположение и характер опирания тяговых двигателей на механическую часть, то есть на элементы тележек, что также требует определенного математического описания [6–8]. Однако при решении таких математических моделей предпочтительней использование средств компьютерного моделирования, что позволит получить более точную оценку динамических качеств рельсовых экипажей.

Для формирования математических моделей пространственных колебаний рельсовых экипажей и исследования взаимодействия подвижного состава и пути в работе [9] используются различные теории по определению сил проскальзывания между колесом и рельсом. При этом в работе не учитывается перемещение рельсовых экипажей в кривых.

Различные аспекты формирования математических моделей тяговых рельсовых экипажей с учетом взаимодействия механических частей и контакта не только с рельсовой колеей, но и с контактным проводом для электроподвижного состава железных дорог, а также с учетом свойств ударно-тяговых устройств и поглощающих аппаратов представлены в работах [10 – 12]. Однако при этом математические модели учитывают перемещение рельсовых экипажей в прямых участках пути.

Определение цели и задачи исследования. Целью данного исследования является создание математической модели для изучения динамической нагруженности четырехосного автономного тягового модуля при движении в одиночном режиме и в составе поезда.

Для достижения поставленной цели определены такие задачи:

1. Выбор базовой расчетной схемы;
2. Математическое описание возможных колебаний тел системы;
3. Определение ограничений и видов связей между телами системы, включая взаимодействие экипажа и рельсового пути;
4. Составление системы дифференциальных уравнений пространственных колебаний автономного тягового модуля в четырехосном исполнении.

Основная часть исследования. Далее рассмотрим порядок формирования математической модели пространственных колебаний железнодорожного четырехосного автономного тягового модуля. Данный вариант конфигурации автономного транспортного средства выбран исходя из предварительных исследований, проведенных автором, по определению характеристик конструкции тягового средства для использования при транспортировке железнодорожных поездов по направлению «Восток – Запад», а точнее по направлению «Шелкового пути». При этом учитывались как механические особенности конструкции,

так и тягово-энергетические параметры автономных тяговых модулей. В данном исследовании рассмотрим движение автономного тягового модуля как механической системы, то есть совокупности твердых тел, связанных между собой системами гашения колебаний и элементами крепления или соединениями различного типа. В начале выполним описание выбранной расчетной схемы.

Расчетную схему четырехосного автономного тягового модуля как механическую конструкцию можно представить в виде системы следующих основных элементов: кузов, тележки и колесные пары. Кузов автономного тягового модуля установлен на двух двухосных тележках. Соединения кузова с рамой тележки обеспечивают возможность поворота тележек относительно кузова в горизонтальной плоскости, что создает момент трения, необходимый для гашения колебаний виляния тележек (пятниковое соединение). Для ограничения колебаний кузова относительно тележек в вертикальной плоскости на рамах тележек установлены скользуны по аналогии с основными типами локомотивов [1–3].

Основными элементами двухосной тележки являются колесные пары и рама. Двухосная тележка оснащена индивидуальным тяговым приводом на каждую ось с опорно-осевым подвешиванием двигателя. Конструкция тележки имеет буксовое (первая ступень) и центральное (вторая ступень) рессорные подвешивания с использованием упругих элементов и гасителей колебаний. Буксовое рессорное подвешивание обеспечивает опору рамы тележки на каждую буксу через два пакета цилиндрических пружин. Для демпфирования вертикальных колебаний параллельно пружинам между буксами и рамой тележки установлено по одному гидравлическому гасителю колебаний на буксовый узел. Кузов опирается на рамы тележки через комплекты двухрядных цилиндрических пружин. Отклонения

тележек относительно кузова в поперечном направлении ограничиваются упругими боковыми упорами, т. е. характеристика поперечной связи кузова с тележками является существенно нелинейной.

В данной математической модели рассматривается движение автономного тягового модуля по упруго-вязкому инерционному пути, который моделируется приведенной к каждому колесу массой (восемь приведенных масс), имеющей только вертикальное и поперечное горизонтальное перемещения и опирающейся в этих направлениях на пружины и демпферы вязкого трения, моделирующие упруго-диссипативные свойства рельсов и подрельсового основания.

Расчетная схема автономного тягового модуля построена как механическая система, которая состоит из девятнадцати твердых тел: кузов, две рамы, четыре

двигателя, четыре колесных пары и восемь приведенных масс пути, имеющих только вертикальные и поперечные горизонтальные перемещения. Таким образом, в общем случае система имеет $11 \times 6 + 8 \times 2 = 82$ степени свободы.

При описании движения рассматриваемого экипажа по участкам пути произвольного очертания выберем неподвижную систему координат $\tilde{O}\xi\eta\zeta$, а для каждого твердого тела – по две подвижные системы координат: естественную $Oxyz$ и связанную с твердым телом $Cx'y'z'$ (Cx' , Cy' , Cz' – главные центральные оси инерции). Все системы координат примем правыми, причем будем считать, что оси $\tilde{O}\xi$, Ox , Cx' направлены слева направо, а оси $\tilde{O}\zeta$, Oz , Cz' – вниз, как представлено на рисунке.

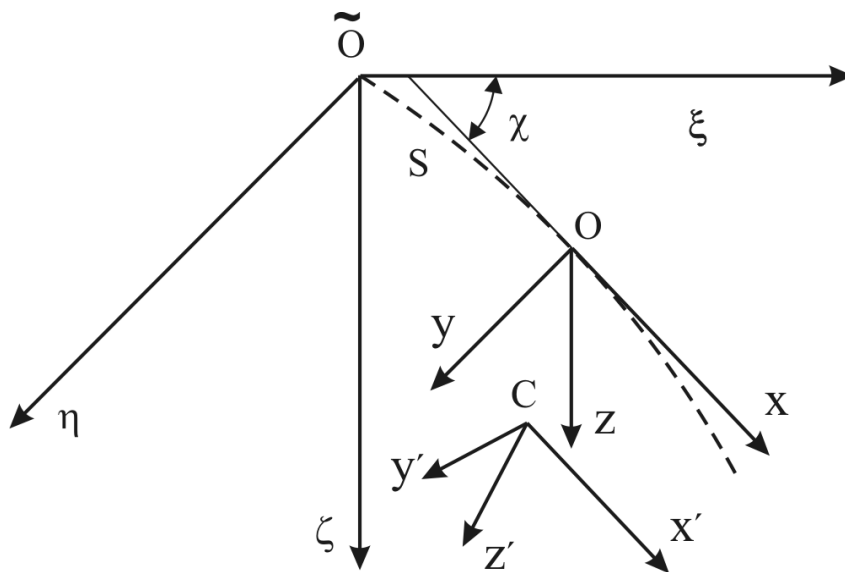


Рис. Системы координат расчетной схемы автономного тягового модуля: $\tilde{O}\xi\eta\zeta$ – неподвижная система координат; $Oxyz$ – подвижная естественная система координат; $Cx'y'z'$ – подвижная система координат, связанная с твердым телом; S – траектория движения автономного тягового модуля; χ – угол между осями $\tilde{O}\xi$ и Ox

Оси естественной системы координат направлены соответственно по касательной, нормали и бинормали к оси пути. Начало

координат O для каждого твердого тела находится на расстоянии s от его

положения в начальный момент времени (здесь s – пройденный путь). Положение естественной системы координат относительно неподвижной характеризуется дуговой координатой вдоль оси пути s , углом χ между осями Ox и $\tilde{O}\xi$ в плане, а также углами φ_h и θ_h между этими осями в вертикальных плоскостях, которые определяются возвышением наружного рельса h_r . Параметры рельса χ, h_r – заданные функции координаты s , для круговой кривой $\dot{\chi}$ и h_r – постоянные, для прямой – приравниваются нулю [4, 13].

При выводе уравнений движения использованы общепринятые обозначения перемещений отдельных тел системы – $x, y, z, \psi, \varphi, \theta$ [5, 14, 15]. Поступательные перемещения x, y, z и углы поворота ψ, φ, θ описывают соответственно подергивание, боковой относ, подпрыгивание и виляние, галопирование, боковую качку твердого тела.

При обозначении координат твёрдых тел системы введены следующие индексы: кузов – f , рама тележки – sl ($l=1,2$), двигатели – b ($b = \overline{1,4}$), колёсная пара – i ($i = \overline{1,4}$ – номер колёсной пары по ходу движения экипажа), колесо – ij ($j=1$ – левая сторона вагона, $j=2$ – правая), рельсы в точках контакта – rij .

При составлении уравнений движения автономного тягового модуля приняты во внимание следующие конструктивные особенности:

- действие сил сухого трения, возникающих при взаимных перемещениях кузова и тележки в плане;
- упруго-вязкая связь кузова с рамой тележки;
- нелинейная характеристика силы в пятниковом узле;
- упруго-вязкая связь рамы тележки с колесными парами;
- наличие дополнительной связи между рамой тележки и осью колесной

пары, вызванное наличием двигателей, имеющих опорно-рамное подвешивание;

– криволинейность профилей поверхностей катания колеса и рельса, а также нелинейность сил взаимодействия между ними.

Для определения числа степеней свободы рассматриваемой механической системы приняты во внимание ограничения, наложенные на перемещения тел, с учетом общепринятых допущений и конструктивных особенностей ходовых частей автономного тягового модуля, по аналогии с тяговым подвижным составом [6].

Вертикальные перемещения и боковая качка колесных пар выражаются через вертикальные перемещения колес

$$z_i = \frac{z_{i1} + z_{i2}}{2}; \quad \theta_i = \frac{z_{i2} - z_{i1}}{2d_1}; \quad (i = \overline{1,4}), \quad (1)$$

где $2d_1$ – расстояние между средними кругами катания колесной пары.

Предполагается, что радиусы r кругов катания всех колес равны между собой. Тогда при совпадении продольных плоскостей симметрии пути и тележки при перемещении автономного тягового модуля вдоль оси пути все колеса повернутся на один и тот же угол

$$\varphi_i = -\frac{x_i + s}{r}, \quad (i = \overline{1,4}). \quad (2)$$

Двигатели во всех направлениях, кроме галопирования, движутся совместно с рамой тележки:

$$\begin{aligned} x_{sl} &= x_b; \\ y_{sl} &= y_b; \\ z_{sl} &= z_b; \\ \theta_{sl} &= \theta_b; \\ \psi_{sl} &= \psi_b \quad (b = \overline{1,4}). \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом полученных связей (1)–(3) система «автономный тяговый модуль – рельсовая колея» имеет $82-32=50$ степеней свободы.

Обобщенные координаты, описывающие конфигурацию рассматриваемой механической системы, выбраны следующим образом:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= y_f; & q_2 &= y_{s1}; & q_3 &= y_{s2}; & q_4 &= y_1; & q_5 &= y_2; \\
 q_6 &= y_3; & q_7 &= y_4; & q_8 &= \psi_f; & q_9 &= \psi_{s1}; & q_{10} &= \psi_{s2}; \\
 q_{11} &= \psi_1; & q_{12} &= \psi_2; & q_{13} &= \psi_3; & q_{14} &= \psi_4; & q_{15} &= \theta_f; \\
 q_{16} &= \theta_{s1}; & q_{17} &= \theta_{s2}; & q_{18} &= z_f; & q_{19} &= z_{s1}; & q_{20} &= z_{s2}; \\
 q_{21} &= \varphi_f; & q_{22} &= \varphi_{s1}; & q_{23} &= \varphi_{s2}; & q_{24} &= x_f; & q_{25} &= x_{s1}; \\
 q_{26} &= x_{s2}; & q_{27} &= x_1; & q_{28} &= x_2; & q_{29} &= x_3; & q_{30} &= x_4; \\
 q_{31} &= \varphi_{b1}; & q_{32} &= \varphi_{b2}; & q_{33} &= \varphi_{b3}; & q_{34} &= \varphi_{b4}; \\
 \\
 q_{35} &= y_{r11}; & q_{36} &= y_{r12}; & q_{37} &= y_{r21}; & q_{38} &= y_{r22}; & q_{39} &= y_{r31}; \\
 q_{40} &= y_{r32}; & q_{41} &= y_{r41}; & q_{42} &= y_{r42}; & q_{43} &= z_{r11}; & q_{44} &= z_{r12}; \\
 q_{45} &= z_{r21}; & q_{46} &= z_{r22}; & q_{47} &= z_{r31}; & q_{48} &= z_{r32}; & q_{49} &= z_{r41}; \\
 q_{50} &= z_{r42}.
 \end{aligned}$$

Дифференциальные уравнения движения четырехосного автономного тягового модуля как сложной механической системы

составлены в форме уравнений Лагранжа второго рода [7, 16, 17]

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i + S_i^*, \quad (i = \overline{1,50})$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии системы;

Φ – функция рассеяния;

q_i, \dot{q}_i – обобщенные координаты и их скорости;

Q_i – соответствующие им обобщенные силы, не имеющие потенциала;

S_i^* – приложенные внешние силы.

Кинетическую энергию автономного тягового модуля (T) определим как сумму энергий всех твердых тел, входящих в систему.

Для каждого из твердых тел кинетическая энергия определяется по теореме Кенига. В общем случае выражение кинетической энергии для i -го твердого тела записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 T_i &= \frac{1}{2} m_i \left[(\dot{s} + \dot{x}_i - y_i \dot{\chi}_i)^2 + (\dot{y}_i + x_i \dot{\chi}_i)^2 + (\dot{z}_i - \dot{h}_{ri})^2 \right] + \\
 &\frac{1}{2} I_{xi} (\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_{hi})^2 + \frac{1}{2} I_{zi} (\dot{\psi}_i + \dot{\chi}_i)^2 + \frac{1}{2} I_{yi} (\dot{\phi}_i + \dot{\phi}_{hi})^2,
 \end{aligned}$$

где m_i – масса i -го твердого тела;

I_i с соответствующими индексами обозначают главные центральные моменты инерции i -го тела;

$\dot{\chi}_i = vK_i$, K_i – кривизна пути под i -м телом;

v – скорость движения;

s – пройденный путь;

h_{ri} – возвышение пути под центром масс i -го тела, вызванное возвышением в кривой наружного рельса на величину $h_r = \theta_h 2d_1$.

Кинетическая энергия системы, моделирующей путь, в соответствии с принятыми допущениями записывается следующим образом:

$$T_t = \frac{1}{2} m_{rh} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \dot{y}_{rij}^2 + \frac{1}{2} m_{rv} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \dot{z}_{rij}^2,$$

$$P_1 = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^4 (k_{czi} \Delta_{czi}^2 + k_{cyi} \Delta_{cyi}^2 + k_{cxi} \Delta_{cxi}^2) + \sum_{i=1}^8 (k_{azi} \Delta_{azi}^2 + k_{ayi} \Delta_{ayi}^2 + k_{axi} \Delta_{axi}^2) + k_s \sum_{i=1}^4 \Delta_{bi} + k_z \sum_{i=1}^4 \Delta_{zi} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 (k_{rzi} \Delta_{rzi}^2 + k_{ryi} \Delta_{ryi}^2) \right],$$

где $k_{czi}, k_{cyi}, k_{cxi}$ – соответственно жесткости i -го упругого элемента центрального подвешивания тележки в вертикальном, горизонтальном поперечном и продольном направлениях;

$\Delta_{czi}, \Delta_{cyi}, \Delta_{cxi}$ – соответственно вертикальный, горизонтальный поперечный и продольный прогибы i -го упругого элемента центрального подвешивания;

$k_{azi}, k_{ayi}, k_{axi}$ – жесткости i -го упругого элемента буксового подвешивания тележки в вертикальном, горизонтальном поперечном и продольном направлениях;

$\Delta_{azi}, \Delta_{ayi}, \Delta_{axi}$ – вертикальный, горизонтальный поперечный и продольный прогибы i -го упругого элемента буксового подвешивания;

k_s – угловая жесткость соединения двигателя с рамой тележки;

Δ_{bi} – угловая деформация соединения i -го двигателя с рамой тележки;

где m_{rh}, m_{rv} – массы пути, приведенные к одному колесу в горизонтальном поперечном и вертикальном направлениях.

Потенциальная энергия рассматриваемой системы (P) равна сумме энергии сжатия упругих элементов подвешивания (P_1) и потенциала сил тяжести (P_2)

$$P = P_1 + P_2.$$

Составляющая потенциальной энергии P_1 определяется по теореме Клапейрона как сумма энергий, накапливаемых в упругих элементах системы при их деформациях, следующим образом:

k_z – жесткость скользуна, установленного на раме тележки, ограничивающего вертикальные перемещения кузова;

Δ_{zi} – взаимное вертикальное перемещение кузова и рамы тележки в зоне i -го скользуна;

k_{rz}, k_{ry} – вертикальная и горизонтальная поперечная жесткости рельсовой колеи;

$\Delta_{rzi}, \Delta_{ryi}$ – вертикальный и горизонтальный поперечный прогибы рельсовой колеи под j -м колесом i -й колесной пары.

Потенциальная энергия, обусловленная опусканием центром тяжести i -го твердого тела, с учетом криволинейного движения определяется следующим образом:

$$P_2 = - \sum_{i=1}^7 m_i g (\theta_{hi} y_i + z_i),$$

где g – ускорение свободного падения;

θ_{hi} – угол между горизонтальной плоскостью под центром масс i -го тела и плоскостью пути, вызванный возвышением наружного рельса над внутренним.

Взаимные перемещения тел, вызывающих деформации упругих элементов, определяются следующим образом:

– вертикальные прогибы упругих элементов центрального подвешивания:

$$\Delta_{cz1} = z_f - l_1 \varphi_f - z_{s1} + b(\theta_f - \theta_{s1} + \theta_{hf} - \theta_{hs1});$$

$$\Delta_{cz2} = z_f - l_1 \varphi_f - z_{s1} - b(\theta_f - \theta_{s1} + \theta_{hf} - \theta_{hs1});$$

$$\Delta_{cz3} = z_f + l_2 \varphi_f - z_{s2} + b(\theta_f - \theta_{s2} + \theta_{hf} - \theta_{hs2});$$

$$\Delta_{cz4} = z_f + l_2 \varphi_f - z_{s2} - b(\theta_f - \theta_{s2} + \theta_{hf} - \theta_{hs2}),$$

где l_1, l_2 – расстояние от центра масс кузова до центра масс первой и второй тележки в продольном направлении соответственно;

$2b$ – расстояние между упругими элементами центрального подвешивания в поперечном направлении;

– горизонтальные поперечные прогибы упругих элементов центрального подвешивания:

$$\Delta_{cy1} = \Delta_{cy2} = y_f + l_1 \psi_f - h \theta_f - y_{s1} - u;$$

$$\Delta_{cy3} = \Delta_{cy4} = y_f - l_2 \psi_f - h \theta_f - y_{s2} - u,$$

где h – расстояние от центра масс кузова автономного тягового модуля до плоскости опирания рам тележек на упругие элементы центрального подвешивания;

$$u = \frac{1}{2}(l_1 + l_2)^2 K_f - \text{стрела дуги криволинейного (в плане) пути под центром масс}$$

кузова в пределах геометрической базы автономного тягового модуля ($l_1 + l_2$) (K_f – кривизна пути под центром масс кузова автономного тягового модуля);

– горизонтальные продольные прогибы упругих элементов центрального подвешивания:

$$\Delta_{cxi} = x_f - x_{s1} + (-1)^i b(\psi_f - \psi_{s1} + \chi_f - \chi_{s1}) - (-1)^i l K_f \quad (i = \overline{1,2});$$

$$\Delta_{cxi} = x_f - x_{s2} + (-1)^i b(\psi_f - \psi_{s2} + \chi_f - \chi_{s2}) - (-1)^i l K_f \quad (i = \overline{3,4}),$$

где χ_j – текущий угол между продольной осью неподвижной системы координат для j -го твердого тела и осью Ox естественной системы координат;

– вертикальные прогибы первой ступени подвешивания:

$$\Delta_{azi} = z_{s1} - a \varphi_{s1} - z_1 - (-1)^i b^* (\theta_{s1} - \theta_1 + \theta_{hs1} - \theta_{h1}), \quad (i = 1, 2);$$

$$\Delta_{azi} = z_{s1} + a \varphi_{s1} - z_2 - (-1)^i b^* (\theta_{s1} - \theta_2 + \theta_{hs1} - \theta_{h2}), \quad (i = 3, 4);$$

$$\Delta_{azi} = z_{s2} - a \varphi_{s2} - z_3 - (-1)^i b^* (\theta_{s2} - \theta_3 + \theta_{hs2} - \theta_{h3}), \quad (i = 5, 6);$$

$$\Delta_{azi} = z_{s2} + a\varphi_{s2} - z_4 - (-1)^i b^* (\theta_{s2} - \theta_4 + \theta_{hs2} - \theta_{h4}), (i = 7,8),$$

где $2a$ – база тележки;

$2b^*$ – расстояние между упругими элементами буксового подвешивания в поперечном направлении;

– горизонтальные поперечные прогибы первой ступени подвешивания:

$$\Delta_{ay1} = \Delta_{ay2} = y_{s1} + a\psi_{s1} - y_1 - u_1^* ;$$

$$\Delta_{ay3} = \Delta_{ay4} = y_{s1} - a\psi_{s1} - y_2 - u_1^* ;$$

$$\Delta_{ay5} = \Delta_{ay6} = y_{s2} + a\psi_{s2} - y_3 - u_2^* ;$$

$$\Delta_{ay7} = \Delta_{ay8} = y_{s2} - a\psi_{s2} - y_4 - u_2^* ,$$

где u_1^* , u_2^* – стрелы дуг криволинейного (в плане) пути в пределах баз первой и второй тележек;

– продольные прогибы первой ступени подвешивания:

$$\Delta_{axi} = x_{s1} - x_1 + (-1)^i b^* (\psi_{s1} - \psi_1 + \chi_{s1} - \chi_1) - (-1)^i aK_{s1}, (i = 1,2);$$

$$\Delta_{axi} = x_{s1} - x_2 + (-1)^i b^* (\psi_{s1} - \psi_2 + \chi_{s1} - \chi_2) - (-1)^i aK_{s1}, (i = 3,4);$$

$$\Delta_{axi} = x_{s2} - x_3 + (-1)^i b^* (\psi_{s2} - \psi_3 + \chi_{s2} - \chi_3) - (-1)^i aK_{s2}, (i = 5,6);$$

$$\Delta_{axi} = x_{s2} - x_4 + (-1)^i b^* (\psi_{s2} - \psi_4 + \chi_{s2} - \chi_4) - (-1)^i aK_{s2}, (i = 7,8);$$

– деформации соединения двигателя с рамой тележки:

$$\Delta_1 = \varphi_{s1} - \varphi_{b1};$$

$$\Delta_2 = \varphi_{s1} - \varphi_{b2};$$

$$\Delta_3 = \varphi_{s2} - \varphi_{b3};$$

$$\Delta_4 = \varphi_{s2} - \varphi_{b4};$$

– взаимные вертикальные перемещения кузова и рам тележек в зоне расположения скользунов:

$$\Delta_{z1} = z_f - z_{s1} - b_s (\theta_f + \theta_{hf} - \theta_{s1} - \theta_{hs1});$$

$$\Delta_{z2} = z_f - z_{s1} + b_s (\theta_f + \theta_{hf} - \theta_{s1} - \theta_{hs1});$$

$$\Delta_{z3} = z_f - z_{s2} - b_s (\theta_f + \theta_{hf} - \theta_{s2} - \theta_{hs2});$$

$$\Delta_{z4} = z_f - z_{s2} + b_s (\theta_f + \theta_{hf} - \theta_{s2} - \theta_{hs2}),$$

где $2b_s$ – расстояние между скользящими в поперечном направлении;

– прогибы пути:

$$\Delta_{rzij} = z_{rij} - z_{ij};$$

$$\Delta_{ryij} = y_{rij}, \quad (i = \overline{1,4}; j = 1,2).$$

В построенной расчетной схеме введены гидравлические гасители колебаний, установленные в обеих ступенях подвешивания. Кроме того, учитывается действие сил сухого трения при взаимных поворотах кузова автономного тягового модуля и рам тележек в плане. При

разработке математической модели движения автономного тягового модуля учтено также рассеивание энергии при вертикальных и горизонтальных прогибах пути.

Диссипативная функция для рассматриваемой системы имеет вид

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 (\beta_{rz} \dot{\Delta}_{rzij}^2 + \beta_{ry} \dot{\Delta}_{ryij}^2) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 (\beta_{czi} \dot{\Delta}_{czi}^2 + \beta_{cyi} \dot{\Delta}_{cyi}^2) + \\ & + \sum_{i=1}^8 (\beta_{azi} \dot{\Delta}_{azi}^2 + \beta_{ayi} \dot{\Delta}_{ayi}^2) + \sum_{i=1}^2 W_i |\dot{\Delta}_{\psi i}|, \end{aligned}$$

где β_{rz}, β_{ry} – коэффициенты рассеяния энергии в пути в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях;

β_{czi}, β_{cyi} – коэффициенты вязкого трения i -го гидравлического гасителя колебаний, установленного в центральной ступени подвешивания в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях соответственно;

β_{azi}, β_{ayi} – коэффициенты вязкого трения i -го гидравлического гасителя колебаний, установленного в буксовой ступени подвешивания в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях соответственно;

W_i – момент сил сухого трения, действующих в горизонтальной плоскости при взаимных поворотах кузова автономного тягового модуля и рамы i -й тележки в пятниковой зоне;

$\dot{\Delta}$ – относительные скорости перемещений тел, соединенных гидравлическими гасителями колебаний;

$\dot{\Delta}_{\psi i}$ – скорость взаимных угловых перемещений в плане кузова автономного тягового модуля и рамы i -й тележки в шкворневом узле ($\dot{\Delta}_{\psi i} = \dot{\psi}_f + \dot{\chi}_f - \dot{\psi}_{si} - \dot{\chi}_{si}$).

Относительные скорости $\dot{\Delta}$ перемещений тел, соединенных диссипативными элементами, определяются как производные по времени от относительных перемещений соответствующих тел.

Обобщенные силы Q_i , не имеющие потенциала, включают в себя силы взаимодействия колес и рельсов, которые определяются с использованием гипотезы крипа. Согласно этой гипотезе касательные силы взаимодействия колес с рельсами зависят нелинейно от безразмерных характеристик проскальзывания. Характеристики и величина сил, действующих в контакте колеса и рельса, определяются по методике, описанной в работе [8].

Составляющие сил крипа определяются по формулам

$$T_{xij} = \frac{\varepsilon_{xij}}{\varepsilon_{ij}} T_{ij};$$

$$T_{\alpha ij} = \frac{\varepsilon_{yij} \sec \alpha_{ij}}{\varepsilon_{ij}} T_{ij} \quad (i = \overline{1,4}, j = 1,2), \quad (4)$$

где T_{xij} – проекция полной силы T_{ij} на продольную ось x ;

$T_{\alpha ij}$ – проекция силы T_{ij} на касательную к профилю поверхности колеса в точке контакта;

α_{ij} – угол между касательной к профилю поверхности колеса в точке контакта и поперечной осью y ;

ε_{ij} – относительная скорость проскальзывания j -го колеса i -й колесной пары по рельсу (крип);

$\varepsilon_{xij}, \varepsilon_{yij}$ – продольная и поперечная составляющие относительной скорости

проскальзывания j -го колеса i -й колесной пары по рельсу;

$$T_{ij} = -F_{ij} \varepsilon_{ij} \left[\left(\frac{F_{ij} \varepsilon_{ij}}{f_{tr} N_{ij}} \right)^4 + 1 \right]^{-\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

где N_{ij} – нормальное давление j -го колеса i -й колесной пары на рельс;

f_{tr} – коэффициент трения скольжения;

F_{ij} – коэффициент крипа j -го колеса i -й колесной пары.

Полный крип ε_{ij} определяется выражением [9]

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{xij}^2 + \varepsilon_{yij}^2 \sec^2 \alpha_{ij})^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Для рассматриваемой системы безразмерные характеристики проскальзываний, необходимые для определения сил псевдоскольжения, определяются следующим образом [7]

$$\varepsilon_{xij} = (\dot{x}_i + (-1)^j d_1 \dot{\psi}_i) V_i^{-1} - \Delta r_{ij} r^{-1} + (-1)^{j+1} d_1 K_i \quad (i = \overline{1,4}; j = 1,2).$$

$$\varepsilon_{yij} = \frac{1}{s} (\dot{y}_i - r_{ij} \dot{\theta}_i - \dot{y}_{rij}) - \psi_i \quad (i = \overline{1,4}, j = 1,2), \quad (7)$$

где d_{ij}^* – расстояние в поперечном направлении между текущей точкой контакта на j -м колесе i -й колесной пары и плоскостью симметрии колесной пары;

r_{ij} – текущий радиус колеса, соответствующий положению точки контакта, который равен $r_{ij} = r + \Delta r_{ij}$;

Δr_{ij} – приращение радиуса круга катания j -го колеса i -й колесной пары в рассматриваемой точке контакта.

Обобщенные силы Q_i вычисляются как коэффициенты при вариациях обобщенных координат в выражениях возможных работ сил псевдоскольжения $T_{xij}, T_{\alpha ij}$.

Обобщенные силы Q_i получены после подстановки (5–7) в (4) и составления возможных работ сил взаимодействия колес и рельсов.

Внешними силами S_i^* , действующими на автономный тяговый модуль, являются сила тяги F_T , развиваемая автономным тяговым модулем, тормозная сила B_T , возникающая при включении тормозов, и силы сопротивления движению W , к которым относят все остальные внешние силы.

В общем случае внешние силы, действующие на автономный тяговый модуль, могут быть представлены в следующем виде:

$$S_i^* = W_i + B_i + F_T,$$

где W_i – сила сопротивления поступательному движению, приложенная к i -му твердому телу;

B_i – тормозная сила, приложенная к i -му твердому телу;

F_T – сила тяги автономного тягового модуля.

После подстановки в уравнения Лагранжа второго рода выражений кинетической и потенциальной энергий, функции рассеяния и обобщенных сил получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая движение четырехосного автономного тягового модуля по прямолинейным и криволинейным участкам железнодорожного пути и представляющая собой систему обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений 100-го порядка.

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений автором разрабатывается специальное программное обеспечение, которое позволяет осуществлять комплексные теоретические исследования пространственных колебаний четырехосного автономного тягового модуля для определения показателей его динамической нагруженности и безопасности движения.

Выводы

1. Выбрана базовая расчетная схема автономного тягового модуля, которая построена как механическая система, состоящая из девятнадцати твердых тел: кузов, две рамы, четыре двигателя, четыре колесных пары и восемь приведенных масс пути, имеющих только вертикальные и попе-

речные горизонтальные перемещения. При этом система имеет 82 степени свободы.

2. Проведено математическое описание возможных колебаний тел системы. При описании движения рассматриваемого экипажа по участкам пути произвольного очертания выбрана неподвижная система координат, а для каждого твердого тела – по две подвижные системы координат. При выводе уравнений движения использованы общепринятые обозначения перемещений отдельных тел системы.

3. Определены ограничения и виды связей между телами системы, включая взаимодействие экипажа и рельсового пути. При этом учтены общепринятые допущения и конструктивные особенности ходовых частей автономного тягового модуля.

4. Составлены системы дифференциальных уравнений пространственных колебаний автономного тягового модуля в четырехосном исполнении.

Таким образом, автором предложено описание оригинальной математической модели пространственных колебаний четырехосного автономного тягового модуля при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам железнодорожного пути. При этом конструкция четырехосного автономного тягового модуля представлена как сложная механическая система, а путь представляет собой упруго-вязкую инерционную систему. Данная математическая модель является базовой для проведения дальнейших теоретических исследований динамики автономных тяговых модулей при одиночном движении или при движении в составе поезда.

Список использованных источников

1. Мямлин С. В., Недужая Л. А. Совершенствование конструкции ходовых частей локомотивов. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2013. № 5 (47). С. 124–136. DOI: 10.15802/stp2013/17977.
2. Мямлин С. В., Лунис О., Недужая Л. А. Особенности конструкции ходовых частей тягового подвижного состава. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2017. № 3 (69). С. 130–146. DOI: 10.15802/stp2017/104824.

3. Spiryagin M., Wolfs P., Cole C., Spiryagin V., Sun Y. Q., McSweeney T. Design of Mechanical Systems of Locomotives from: Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains. CRC Press. 2016. 477 p.
4. Радченко Н. А. Криволинейное движение рельсовых транспортных средств. Київ: Наукова думка, 1988. 212 с.
5. Лазарян В. А. Динамика транспортных средств: избр. тр. Київ: Наукова думка, 1985. 528 с.
6. Garg V., Dukkipati R. Dynamics of Railway Vehicle Systems. Toronto: Academic press, 1984. 407 p.
7. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей / Ю. В. Демин, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко, О. М. Маркова. Київ: Наукова думка, 1984. 160 с.
8. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол, Е. Ю. Трубицкая, С. Ф. Редько, А. И. Залесский. Київ: Наукова думка, 1989. 240 с.
9. Kalker J. J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Springer Netherlands, 1990. 314 p. DOI 10.1007/978-94-015-7889-9.
10. Myamlin S., Luchanin M., Neduzha L. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives. ТЕКА. *Commision of Motorization and Power Indastry in Agriculture*. 2013. Vol. 13, № 3. P. 162-169.
11. Ткаченко В. П., Малюк С. В. Моделювання руху традиційної колісної пари в прямих ділянках колії та доцільність її модернізації. *Логістичне управління та безпека руху на транспорті*: матеріали науково-практ. конф. 5-7 жовтня 2017 р., м. Лиман (Донецька обл.). Севе́родонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2017. С. 169-172.
12. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Розробка тривимірної моделі системи «рама візка – тягові електродвигуни» для електровоза ЧС4 за допомогою програмного продукту SolidWorks. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 4. С. 21-29.
13. Буйносов А. П., Тихонов В. А. Разработка математической модели механической части электровоза ВЛ11К. Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы всеросс. научно-техн. конф. с междунар. участием, 10-11 ноября 2011 г. Омск: Омский гос.ун-т путей сообщения, 2011. С. 33-38.
14. Коссов В. С., Сазонов И. В. Основные направления совершенствования проектирования и производства локомотивов, позволяющие снизить стоимость их жизненного цикла. *Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»*. 2016. № 5. С. 5-12.
15. Моделирование системы «электроподвижной состав–тяговая сеть» и влияние на процессы управления движением субъективных факторов / В. И. Омеляненко, Н. Н. Калюжный, В. Е. Бондаренко, Л. В. Оверьянова. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*: сб. науч. трудов. Темат. вып.: Транспортное машиностроение. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. № 18. С. 75-83.
16. Орлов Е. А. Параметрический подход к моделированию динамики железнодорожных экипажей. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*: сб. науч. трудов. Темат. вып.: Машиноведение и САПР. Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. № 33. С. 77-87.
17. Wu Q., Cole C., Luo S., Spiryagin M. A review of dynamics modelling of friction draft gear. *Vehicle System Dynamics*. 2014. Vol. 52, №. 6. P. 733-758. URL: <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.894199>.

Буреш Франтишек, АО «Украинские железные дороги», член правления. ORCID ID: 0000-0003-2171-7476.
Тел. +38-044-465-00-41.

František Bures, Joint stock company «Ukrainian Railways», Member of the Board. ORCID ID: 0000-0003-2171-7476. Tel. +38-044-465-00-41.

Статтю прийнято 26.11.2020 р.

УДК 629.424.3

IMPROVING THE DIESEL FUEL QUALITY FOR TRACTIONAL ROLLING STOCK DIESEL ENGINES

Engineer I. I. Kostyria, engineer P. I. Liubenko, PhD (Tech.) O. V. Artemenko, PhD (Tech.) D. O. Aulin

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛІВ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Інженери І. І. Кости́ря, П. І. Любе́нко, кандидати техн. наук О. В. Арте́менко, Д. О. Аулі́н

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230407>

Abstract. *At the present stage of development of technology and engine building, the use of engines as transport power plants, improving their reliability, efficiency, and reducing the toxicity of diesel fuel combustion products are a cutting issue. In railway transport, traction rolling stock is generally well worn and requires funds to renew it. Thus, there are two ways to improve the technical and economic indicators of locomotives: modernization and application of technical diagnostics, and application of chemmotological methods. The first way is associated with big capital investments and additional time costs. Along with the urgent need for its development and application, the second way pays off much faster in the presence of efficient and affordable treatment methods and chemical additives to diesel oil products.*

Keywords: *diesel engine, diesel fuel, fuel treatment, additives, efficiency.*

Анотація. *Найбільш важливими показниками транспортних дизелів є надійність, ефективність функціонування і токсичність газів, що відробили. В статті розглянуто питання підвищення ефективності функціонування тепловозних дизелів впровадженням технічних та технологічних засобів енергозбереження. На залізничному транспорті тяговий рухомий склад в основному має високий ступінь зношеності і недостатньо коштів для його поновлення. У цих умовах існують два шляхи поліпшення техніко-економічних показників локомотивів: модернізація та застосування технічної діагностики; застосування хімотологічних заходів. Перший напрям пов'язаний зі значними капітальними вкладеннями і додатковими витратами часу. Поряд з гострою необхідністю його розвитку і застосування другий напрямок, за наявності ефективних і прийнятних за вартістю способів обробки і хімічних добавок до дизельних нафтопродуктів, окупається значно швидше. Поліпшення будь-яких експлуатаційних властивостей дизельного палива через зміну їхнього хімічного складу вимагає величезних витрат, у той же час зміна тих або інших властивостей дизельного палива можлива внаслідок введення у нього присадок, що дають такий же або більший ефект, ніж зміна технології виробництва або впровадження фізичних методів обробки із застосуванням спеціального бортового або стаціонарного обладнання. Умовно ці заходи можна поділити на два типи: 1) для доведення якості дизельних палив до вимог стандарту; до них належать протизносні, цетанопідвищувальні і депресорно-диспергувальні; 2) для поліпшення експлуатаційних властивостей палив понад вимоги специфікації і надання паливу*

особливої якості. В результаті дослідження сформульовано технічні вимоги до комплексного заходу щодо підвищення якості дизельного палива для дизелів тепловозів, запропонована методика визначення ефективності запропонованих заходів при експлуатаційних випробуваннях в умовах депо.

Ключові слова: дизельний двигун, дизельне паливо, обробка палива, присадки, ефективність.

Introduction. Resource conservation is a top-priority problem in resource-intensive industries, which include transport that consumes 13.4 % of the total flow of primary energy resources.

The large focus is on reducing the level of resource use in transport, in particular, on addressing issues of rational consumption and use of material, energy, labor, information, and financial resources [1].

In modern conditions, an important area is to increase the efficiency of fuel and energy resources. This corresponds to the program of development of railway transport of Ukraine. The constant rise in energy prices dictates the need to find new reserves that would reduce fuel costs together with the toxicity of diesel locomotives. It is also due to the high degree of wear of the locomotive fleet of Ukraine, however, the tense economic situation is an obstacle to fully renew the operating fleet of locomotives.

Literature review. There are two main ways to improve the technical, economic, and environmental performance of diesel rolling stock:

- modernization and application of technical diagnostics;
- application of chemotological measures (use of effective additives to diesel fuel and motor oil, physical methods of fuel and motor oil treatment) [2].

The first area entails big capital investments and additional expenses. The second area pays off much faster if using effective and affordable chemical additives to petroleum products, or equipment for its processing.

Chemotological measures can be conditionally divided into two types:

- to bring the quality of diesel fuels to the standard requirements;

- to improve the performance of fuels beyond the specification requirements and obtain fuel of special quality.

The quality of diesel fuel changes significantly during transportation, storage, and other technological operations performed before filling the diesel rolling stock.

The main reasons for changes in the quality of petroleum products are some technological operations that lead to evaporation, oxidation, contamination of fuel with dust, and sedimentation. Thus, in general, the fuel when filling the rolling stock deviates from the technical requirements of the DSTU [9].

Improving any performance of motor fuels by changing their chemical composition requires huge costs. At the same time, certain properties of motor fuels may be changed by additives, which allows a positive effect equivalent to a change in production technology. Oil refineries of all developed countries introduce various additives into motor fuels; the world market offers more than 1000 additives, the purpose and classification of which are detailed in papers [3-5]. Consumption of additives to motor fuels in the United States reaches 100,000 tons per year. Additive manufacturers accentuate the benefits of their products but keep, in most cases, their composition a secret.

The patent literature review shows that most of the proposed additives cannot be used as they increase the toxicity of exhaust gases, impair the properties of fuels, significantly increase the cost of fuel. Some additives used are currently banned for environmental (containing lead, barium, manganese) and operational reasons [6-8].

Objective and tasks. The objective of the research is to analyze and generalize the experience and develop a proposal for the application of effective measures and means to improve the quality of diesel fuel for diesel locomotives. The task of the research is to:

- analyze the experience of applying chemmological measures to improve the quality of diesel fuel for locomotives;
- determine technical requirements for chemmological measures to improve the quality of diesel fuel for locomotives;
- develop their efficiency assessment technique in the locomotive depot settings.

Main part. Currently, the production and use of additives in Ukraine are only gaining their industrial potential, while products in demand are still mainly foreign additives. The cost of imported anti-wear additives is usually higher, as raw materials are purchased at foreign factories and delivered back as a marketable product.

At the request of Ukrzaliznytsia, SE Malyshev Plant has conducted bench tests of samples of six diesel fuel additives of different manufacturers.

None of the presented diesel fuel additives proved their effectiveness in the tests conducted following the requirements of JSC Ukrzaliznytsia.

That is:

- the difference between the results of measurements of fuel consumption with and without additives is within the experimental error;
- the effect on the concentrations of pollutants in the exhaust gases of a diesel engine in the test modes is such that the difference between the concentrations of pollutants in the exhaust gases during the operation of a 7D80A diesel engine on fuel with and without additives is a few percent;
- the effect of additives on smoking of the exhaust gases was within the smoke meter error ($\pm 1\%$);
- the tests found no significant effect of additives on such basic indicators of the operating process as maximum combustion

pressure (average) on P_z^{av} cylinders, the temperature of exhaust gases near cylinders t_c^{av} , frequency of rotation of a rotor of the turbocharger n_{tc} , excess air pressure in the receiver P_s^{exc} , exhaust gas pressure before the turbine P_s^{exc} ;

- the tests found no effect of additives on fuel equipment, diesel oil, and fuel filters.

More thorough conclusions about the effect of additives on the above parameters require operational tests.

The use of additives in the operation of locomotives sets the question of their introduction technique to diesel fuel. In addition to accurate dosing, additives must be evenly distributed in the fuel. As a rule, manufacturers neglect it, and the high-quality introduction and distribution of additives in diesel fuel may require creating the necessary technological equipment.

Thus, it is necessary to conduct research aimed at formulating technical requirements for the additive to diesel fuel for diesel locomotives, which has an integrated effect.

Another way of changing the quality of diesel fuel is the physical impact - the use of additional hydrodynamic, magnetic, electrodynamic, or ultrasonic treatment. For this, the specialists of Ukrainian State Railway Academy have developed and tested a method to improve the anti-wear and anti-corrosion properties of diesel fuel to increase the wear resistance of fuel equipment of diesel engines through hydrodynamic dispersion [10].

The specialists of Ukrainian State Railway Academy also took part in bench tests of the cavitation reagent-free diesel fuel treatment device. It is used to change the properties of liquid products and mixtures. This technology is a series of measures based on the principles of hydrodynamic cavitation, leading to the rupture of polymer bonds, i.e. obtaining low molecular weight compounds, and as a consequence, changes (facilitation) of the fractional composition of the treated diesel fuel [11].

Both measures affect the physicochemical properties of diesel fuel but do

not provide significant savings in diesel fuel, however, the physical treatment of fuel is still feasible.

Thus, it may be necessary to consider integrated devices for changing the quality of diesel fuel. That is, devices that have an additional physical effect on and dose additives to diesel fuel.

An example of such a device is a KT-14D fuel catalyst, which is also an additional diesel

fuel fine filter that pre-modifies diesel fuel using a tableted granular additive catalyst.

The device is installed in the fuel supply system of the diesel locomotive, and by actively influencing the fuel, prevents the formation of harmful substances, increases the technical performance of the internal combustion engine.

The first chamber is where sedimentation of heavy fractions, which have got to fuel, and selective purification of diesel fuel from sulfur compounds and pitches occur.

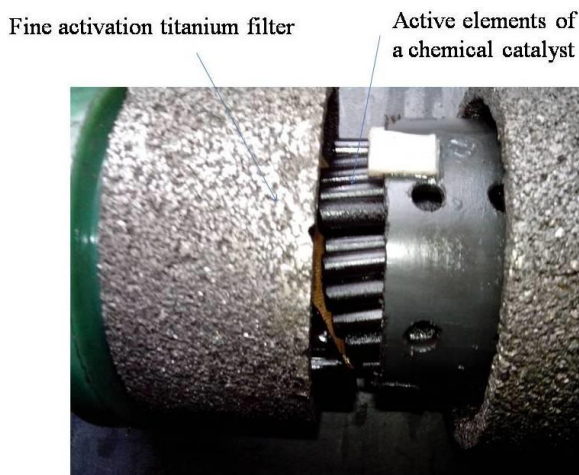


Fig. Fine activation titanium filter with active elements

The device is installed in the fuel supply system of the diesel locomotive, and by actively influencing the fuel, prevents the formation of harmful substances, increases the technical performance of the internal combustion engine.

The first chamber is where sedimentation of heavy fractions, which have got to fuel, and selective purification of diesel fuel from sulfur compounds and pitches occur.

In the second chamber, the fuel is catalytically treated by contacting its hydrocarbon molecules with a highly porous active surface of the granular catalyst, which includes compounds of metals and catalytically active organic compounds. After that, the fuel is processed at the molecular level by tableted additives, metal salts, which are formed under the influence of high temperatures and pressure during combustion in the cylinder chamber in the form of molecules.

In the third chamber, modified fuel is subjected to additional activation and stabilization due to the use of titanium glasses activators. The effect of catalytic fuel treatment lasts for 30-40 seconds. Integrated fuel treatment enhances complete combustion, thereby reducing fuel consumption and release of harmful substances into the atmosphere with exhaust gases.

The integrated diesel fuel treatment plant has passed many bench and operational tests in the locomotive depot and has shown its influence on fuel consumption and environmental performance of the locomotive. To determine the efficiency, we need to conduct operational tests on different series of diesel rolling stock.

To assess the effectiveness of chemotological measures in operational tests of locomotives, it is necessary to determine the

nature of the change in time of the main indicators [12]. Therefore, it is important to determine:

- change in the volume of work performed in operation;
- fuel and engine oil consumption for the work performed;
- expenditure of funds for repairs in operation.

As a criterion for the cost of repairs let us take specific costs in UAH per 1000 km, i.e.:

$$C_{num} = \frac{B}{L'} \cdot 10^3, \quad (1)$$

where B is the unit cost of repair;

L' is the time between overhaul.

Thus, it is possible to obtain proportional coefficients for the economic evaluation of the efficiency of locomotives, representing the useful work costs in UAH; knowing the cost of one ton-kilometer, one kg of fuel and oil, we get:

$$E_x(t) = A[c_1 - (g_T c_2 + g_M c_3)] - c_{num} L, \quad (2)$$

where $E_x(t)$ is the efficiency of the diesel generator;

A is the volume of transportation work performed;

$g_T g_M$ is fuel and oil consumption per km;

c_1 is the cost of 1 tonne-km gross;

$c_2 c_3$ is the cost of one kg of fuel and oil, respectively;

c_{num} is the specific cost of repairs attributed to one km;

L is the total mileage during time t .

To assess the effectiveness of operational tests of locomotives in locomotive depots, an optimization model with the following objective function is proposed, which considers the dynamic characteristics of the main components of efficiency in the form of:

$$E = \frac{\int_{l_1}^l [c_1 \varphi_{II}(l) + c_2 \varphi_M(l) + c_3 \varphi_H(l)] dl}{\int_{l_1}^l [c_1 \varphi_{II}'(l) + c_2 \varphi_M'(l) + c_3 \varphi_H'(l)] dl} \Rightarrow \max, \quad (3)$$

$$l_1 \leq l \leq l_p,$$

where l_1 is the initial mileage of the implementation of the technical solution;

l_p is mileage before overhaul, where the effectiveness of the implementation of the experimental technical solution is evaluated;

$\varphi_{II}(l)$ is the relationship of fuel consumption to mileage;

$\varphi_M(l)$ is the relationship of engine oil to mileage;

$\varphi_H(l)$ is the relationship of repair costs to mileage.

The given target function is based on the assumption that oil fuel consumption and repair costs are independent of each other.

This optimization model is the basis of automated technology for operational tests in locomotive depots.

To quantify the effectiveness of operational tests, we need to obtain the average monthly dynamics of diesel fuel, oil, and repair costs, as well as to calculate the average monthly dynamics of the integrated efficiency of the tested resource-saving measures.

Conclusions. Thus, the application of chemmotological measures to improve the

quality of diesel fuel can optimize changes in the technical condition of diesel engines, reduce diesel fuel consumption, improve the environmental performance of locomotive engines, which will reduce the cost of locomotive depots for the environment. Preliminary tests of measures showed positive changes in technical, economic, and environmental parameters (reduction of fuel consumption in operation, reduction of specific

consumption in rheostatic tests) of the locomotive and improvement of the technical condition of the locomotive engine. It is expedient to conduct the comprehensive operational tests of the proposed measures, with the assessment of the effectiveness of resource-saving measures according to the proposed integrated criterion for assessing the efficiency of locomotives during operational tests in the depot settings.

References

1. Aulin D., Zinkivskiy A., Anatskiy O., Kovalenko D. (2018) Measures for Resource Saving for Diesel Locomotives. *International Journal of Engineering & Technology*, 7, 152-156.
2. Tartakovskiy E. D., Aulin D. O., Artemenko O. V. (2013) Raboty kafedry ERPS UkrHAZT po vnedreniyu resursosberehaiushchykh tekhnolohiy v lokomotyvnom khoziaistve. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. Volodymyra Dalia*, 4, 243–246.
3. Danylov A.M. (2005) Prymenenye prysadok k toplyvu. *Moskva, Myr* 288 s.
4. Mytusova T.N. (2009) Sovremennoe sostoianye proyzvodstva dyzelnykh toplyv. *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal. Myr nefteproduktov. Vestnyk neftiannykh kompaniy*, 9, 6-16.
5. Mytusova T. N., Polyna E. V., Kalynyna M. V. (2002) Sovremennyye dyzelnyye toplyva y prysadky k nym. *Moskva, Tekhnika*, 64 s.
6. Tina Kegl, Anita Kovač Kralj, Breda Kegl, Marko Kegl. (2020) Nanomaterials as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges. *Combustion Science*, 83, doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100897
7. Xinda Zhu, Öivind Andersson. (2020) Performance of new and aged injectors with and without fuel additives in a light duty diesel engine. *Transportation Engineering*, 1, doi.org/10.1016/j.treng.2020.100007
8. Gabriel Popa, Marius Alin Gheți. (2020) Locomotive Diesel Engine Operation with Optimal Specific Fuel Consumption. *Procedia Manufacturing*, 46, 440–444. URL: doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.064
9. Levytyn R. E. (2007) Yzmenenye kachestva nefteproduktov v protsesse dostavky ykh potrebyteliu. *Neftezhazovoe delo*. URL: <http://www.ogbus.ru>,
10. Ventsel Ye. S., Zhalkin S. H., Kravets A. M., Sadiiev S. A. (2002) Pidvyshchennia protyznoshuvalnykh vlastyvostei dyzelnoho palyva hidrodynamichnym dysperhiruvanniam. *Zb. nauk. prats. UkrDAZT, Kharkiv*, 50, 88-94.
11. Obrabotka dyzelnoho toplyva kavytatsyonnym vozdeistvyem. URL: <http://www.kavitus.com/ru/?q=tech/obrabotka-dyzelnoho-toplyva-kavytatsyonnym-vozdeistvyem>.
12. Tartakovskiy E. D., Aulin D. O., Androsov D. S. (2011) Vyznachennia efektyvnosti khimnotolohichnykh zakhodiv pidvyshchennia efektyvnosti teplovoziv v ekspluatatsii. *Sbornyk nauchnykh trudov "Vestnyk NTU "KhPY": Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, 34, 67–71.

Kostyrya Ivan, chief manager of the locomotive department “KTZ-FREIGHT TRANSPORTATION” JSC.

Tel.: + 8 (7172) 60-30-30, E-mail: dimmo@ex.ua.

Liubenko Petr Yvanovich - CEO TOV NVF EKO-AVTO-TITAN. Tel.: +380972233851. E-mail: eco-at@ukr.net.

Artemenko Oleksandr, PhD (Tech.), head of production and technical department Lozova Locomotive Depot of the "Southern Railway" JSC "Ukrzaliznytsia". Tel.: +38 (050) 9544355. E-mail: my.pochta77@ukr.net.

Aulin Dmitriy, PhD (Tech.), Senior lecturer, of Department "Exploitation and Repair of Rolling Stock", Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-7990-4808. Tel.: +38 (057) 730-19-98. E-mail: aulin@kart.edu.

Костиця Іван Іванович, головний менеджер департаменту локомотивного господарства ТОО "КТЖ-Грузовые перевозки"(Казахстан). Тел:+ 8 (7172) 60-30-30. E-mail: dimmo@ex.ua.

Любенко Петро Іванович, генеральний директор ТОВ НВФ ЭКО-АВТО-ТИТАН Тел:+380972233851.

E-mail: eco-at@ukr.net.

Артеменко Олександр Вікторович, кандидат технічних наук, начальник виробничо-технічного відділу "Локомотивного депо Лозова" РФ "Південна залізниця" АТ "Укрзалізниця" Тел: +38 (050) 9544355.

E-mail: my.pochta77@ukr.net.

Аулін Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-7990-4808. Тел:+38 (057) 730-19-98. E-mail: aulin@kart.edu.

Статтю прийнято 30.11.2020 р.

УДК 621. 874

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОВЕДЕННЯ ТАРИРОВКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ
У КОМПЛЕКСІ З ВИМІРЮВАЛЬНИМ ОБЛАДНАННЯМ**

Доктори техн. наук Н. М. Фідровська, Р. В. Пономаренко,
кандидати техн. наук Є. Д. Слепужніков, Д. С. Козодой

**JUSTIFICATION OF TENSORISTOR CALIBRATION IN A COMPLEX WITH
MEASURING EQUIPMENT**

D. Sc. (Tech.) N. Fidrovska, D. Sc. (Tech.) R. Ponomarenko,
PhD (Tech.) E. Slepuzhnikov, PhD (Tech.) D. Kozodoi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230411>

***Анотація.** У статті розглянуто процес проведення тарировки тензорезисторів та вимірювального обладнання. Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії – дуже важливе завдання в режимі реального часу. Але для такого дослідження необхідно відкалібрувати тензодатчики. Калібрування необхідно виконати для визначення функціонального взаємозв'язку між навантаженням, що діє на деталь, яку буде випробувано, і вихідним сигналом обладнання.*

***Ключові слова:** тарировка, тензорезистор, навантаження, електротензометрія, вантаж.*

***Abstract.** The article describes the process of calibrating strain gauge and measuring equipment. Modern machines have a complex design of the shapes of parts and assemblies. The loads acting on them often do not allow the determination of the stress state by modeling or calculation when creating these structurally complex machines. Therefore, conducting experimental studies using the strain gauge method is an extremely important task in real time. But for such a study, it is necessary to calibrate the strain gauges. Calibration must be performed to determine the functional relationship between the load applied to the part to be tested and the equipment output. Depending on the size, as well as the configuration and other features of the investigated part, several methods of calibration of strain gages are used: direct and indirect. To obtain reliable measurement results, the calibration conditions should differ as little as possible from the conditions of experimental studies of the tested parts.*

Calibration must be performed to determine the functional relationship between the load applied to the part to be tested and the equipment output. Depending on the size, as well as the configuration and other features of the investigated part, several methods of calibration of strain gages are used: direct and indirect. To obtain reliable measurement results, the calibration conditions should differ as little as possible from the conditions of experimental studies of the tested parts.

Calibration consists in finding a functional relationship between the load acting on the tested part and the output signal of the equipment. To do this, creating previously known loads on the part

on which the strain gauges are glued, and comparing the value of these loads with the intensity of the output signal, their ratio is determined analytically or graphically.

Electrotensometry uses bridge and half-bridge measurement circuits. The half-bridge circuit is widely used, especially in static processes, where one strain gauge is active, and the other is located in the area of the load and is used for temperature compensation.

Keywords: calibration, strain gauge, tension, electrical strain gauge, cargo.

Вступ. Деталі машин протягом експлуатаційного циклу та в процесі зберігання, разом із зношуванням, схильні до таких видів руйнувань і пошкоджень: механічні, електрохімічні (корозійні) та ін. Механічні види руйнування і пошкодження виявляються у вигляді тріщин, полумок, пробоїв, деформацій, втрати пружності [1, 2].

Тріщини і полумки деталей з'являються внаслідок тривалого впливу навантажень змінного характеру, що повторюються у часі та викликають в результаті втомні руйнування. Мікроскопічні тріщини, які виникають на поверхні деталі в початковому етапі, в подальшому прогресують та проникають вглиб деталі, при цьому охоплюючи більшу частину її перетину. Якщо такий стан залишається не поміченим вчасно, така деталь неминуче руйнується [3]. Такий різновид полумок характерний для осей, валів, шатунів, шатунних болтів та зубів шестерень. Окрім цього, до тріщин здатні призводити своїм впливом значні місцеві навантаження, удари і перенапруження [4, 5]. Такі явища можуть виникати у найбільш навантажених ділянках таких елементів: рами, балки мостових кранів, блоки, корпуси коробок передач, задні мости та інші корпусні деталі [6].

Одним із заходів для запобігання виникненню несправностей втомного характеру є обробка поверхонь такими способами: обкатка робочих поверхонь деталей шариками та роликками, зниження шорсткості поверхні, формування правильних радіусів переходу від однієї поверхні до іншої.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складність конструктивних форм вузлів і деталей сучасних машин, різноманіття діючих на них навантажень у

більшості випадків не дозволяють визначати напружений стан розрахунковим шляхом або моделюванням при створенні машин нових конструкцій [7, 8].

Аналіз попередніх досліджень показав, що для експериментального дослідження локальної області установки в процесі експлуатації найбільш оптимальним методом є тензометрія [9–11].

Тензометрування машин, механізмів, агрегатів і технологічного обладнання необхідно для оцінки напружено-деформованого стану елементів, деталей і вузлів при експлуатаційних або спеціальних режимах роботи [12].

Тензометрія як метод заснована на здатності вимірювання та аналізу деформацій, що у свою чергу дає можливість оцінки напруженого стану [13, 14].

Тензорезистори являють собою резистори, електричний опір яких змінюється пропорційно зі зміною їх лінійних розмірів під дією механічного напруження на поверхні об'єкта дослідження. [15]. Робота тензорезисторів заснована на явищі тензоефекту, зміні опору провідників при їх механічній деформації.

Це дає підстави стверджувати, що проведення тарировки тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням є доцільною.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні проведення тарировки тензорезисторів у комплексі з вимірювальним обладнанням.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– провести тарировку тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням;

– побудувати функціональну залежність між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом вимірювально-реєструвального обладнання.

Основна частина дослідження.

Геометричні розміри тензорезисторів змінюються при їх деформації. Основну роль в утворенні електричного сигналу в напівпровідникових тензорезисторах відіграє зміна їх питомого опору під дією механічного навантаження.

Чутливість як механічних, так і напівпровідникових тензорезисторів оцінюється коефіцієнтом тензочутливості k , визначеним тензоэффектом

$$k = 1 + 2\mu + \nu = (\Delta R/R) / (\Delta l/l),$$

де μ – коефіцієнт Пуассона;

ν – коефіцієнт зміни питомого опору провідника;

ΔR – приріст опору провідника;

R – опір провідника;

Δl – приріст (зменшення або збільшення) геометричних параметрів провідника;

l – довжина провідника.

Дротовий тензорезистор являє собою конструкцію, де чутливий елемент виготовлений з дроту діаметром 0,02–0,05 мм, нанесеного на підкладку (основу) лакової плівки або тонкого паперу.

Як матеріал для дроту константан використовується найчастіше, це характеризується великим коефіцієнтом тензочутливості k і малим температурним коефіцієнтом опору (Cu-Ni-Mn).

Тензорезистори, які були відібрані для проведення тарировки, були перевірені. Також був виміряний опір тензорезисторів та проведено їх групування за мінімальним розкидом. Але найбільш відповідальною операцією є підготовка поверхні деталі, на яку наклеюються тензорезистори, та забезпечення чистоти поверхонь, які склеюються.

Також було проведено розмітку схеми наклеювання тензорезисторів (тензорезистори були розміщені на

випробовуваній деталі так, щоб під час деформації деталі решітка тензорезистора розтягувалася або стискалася). Підготовлена для наклеювання деталей була нагріта до рекомендованої температури 50–70 °С та проведений контроль якості наклеювання тензорезисторів. Також здійснено гідроізоляцію тензорезисторів для захисту від дії вологи, теплоти та механічних пошкоджень.

Після вищевказаних заходів необхідно провести тарировку тензорезисторів у комплексі з вимірювальною апаратурою.

Тарировка полягає у віднайденні функціональної залежності між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом апаратури. Для цього, створюючи заздалегідь відомі навантаження на деталь, на якій наклеєні тензорезистори, і порівнюючи значення цих навантажень з інтенсивністю вихідного сигналу, визначають аналітично або графічно їх співвідношення.

Залежно від розмірів, конфігурації та інших особливостей досліджуваної деталі використовують два способи тарировки тензорезисторів: безпосередній і непрямий.

Для отримання достовірних результатів вимірювань умови тарировки повинні якнайменше відрізнятися від умов проведення експериментальних досліджень об'єктів. Це означає, що схема навантаження деталі, склад вимірювальної системи, умови її експлуатації як при тарировці, так і при випробуваннях мають бути однаковими.

Тому для визначення отриманих результатів напружень, деформацій у досліджуваній деталі (балці мостового крана) була проведена безпосередня (статична тарировка).

В електротензометрії використовують дві схеми вимірювання: мостову і напівмостову. Мостова схема частіше застосовується при статичних процесах. У такій схемі один тензорезистор є активним, а інший розташовується в зоні дії навантаження і використовується як температурний компенсатор.

У випадку, коли на досліджувану деталь діють різні види навантажень, які викликають деформації згину, кручення, зсуву, стиску або розтягнення, тензорезистори розташовуються в схемі таким чином, щоб вони були здатні сприймати різні види деформації. Для цього було використано напівмостову схему підключення.

У схемі використовуються два активних тензорезистори з ортогональним і опозитним розташуванням, з термокомпенсацією. Тензорезистори фіксуються таким чином, щоб вісь симетрії дротової решітки збігалася за напрямком з віссю дії деформації, яка вимірюється.

Деформація вигину виключена підключенням у протилежних напрямках. У досліджуваній деталі (балка мостового крана) при навантаженні переважає деформація розтягування. Під навантаженням балка прогинається і тим самим збільшується її довжина, а ширина, навпаки, зменшується.

Зовнішні дроти тензорезисторів за допомогою клемних колодок з'єднувались з дротами напівмостової схеми, яка була підключена до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) ZetLab 210 (рис. 1).

Тарировка полягала в підйомі і поступовому нарощуванні маси вантажу з 0,0 до 3500 кг, при кроці нарощування вантажу у 500 кг.

Вагу вантажу вимірювали за допомогою динамометра ДПУ-10-2. Динамометр ДПУ-10-2 застосовується для вимірювання статичних розтягувальних зусиль, відградуированих у кілоньютонках. Динамометр здатен працювати в діапазоні температур довкілля від -10 до +45 °С і при відносній вологості не більше 60 %. Габаритні розміри – 780 x 280 x 200 мм.

Межі вимірювань динамометра ДП-10-2:

– мінімальна – 10 кН (1000 кгс);

– максимальна – 100,0 кН (10000 кгс, 10 тс).



Рис. 1. Загальний вигляд вимірювального обладнання:
1 – клемна колодка; 2 – електронно-обчислювальна машина (ЕОМ);
3 – АЦП; 4 – напівмостова схема підключення

Ціна поділки – 1,0 кН (100 кгс). Межі основної зведеної похибки $\pm 2\%$, при знятті навантаження з динамометра стрілка відлікового пристрою встановлюється на нульову позначку таким чином, щоб похибка складала не більше 0,5 ціни поділки шкали.

Межі додаткової похибки динамометра 10 т (100 кН), обумовлені зміною температури докільця в робочому діапазоні температур, відмінних від температури нормальних умов, 0,25 основної похибки на кожні 10 °С.

Межа допустимого значення варіації показань динамометра не перевищує абсолютного значення межі допустимого значення основної похибки. Поріг реагування – не більше 0,5 % найбільшої межі вимірювання [16].

Допустиме перевантаження – 100 % від найбільшої границі вимірювань. Маса динамометра ДПУ-10-2 – 20 кг.

При підйомі вантажу затримка під час кожного циклу (рис. 2) становила 60 с, при опусканні вантажу – 180 с.



Рис. 2. Фіксація вантажу під час тарировки:
а – вага вантажу 1000 кг; б – вага вантажу 2000 кг; в – вага вантажу 3000 кг

Для проведення подальших розрахунків використовували такі вихідні дані:

- довжина робочої поверхні (прогін крана) – $l_p = 22500$ мм;
- матеріал виготовлення моста крана – ВМстЗпс;
- товщина стінки балки – $\delta = 6$ мм;
- тривалість підйому вантажу – 180 с, $t_n = 60$ с;
- тривалість опускання вантажу – 60 с, $t_o = 180$ с;
- довжина тензорезистора – $l_\delta = 30$ мм;

- живлення тензометричного моста – $E_v = 1,5$ В;
 - коефіцієнт тензочутливості – $k_\delta = 2$;
 - коефіцієнт Пуассона – $\nu = 0,3$;
 - напруження в досліджуваній деталі (балка мостового крана), отримані експериментальним шляхом – e_0 мВ;
 - модуль Юнга – $E = 2,05 \cdot 10^5$ Н/мм².
- За підсумками експериментальних досліджень були отримані напруження в досліджуваній деталі (балка мостового крана), рис. 3.

Використовуючи програму розрахунків Mathcad15, визначимо інші деформації і напруження (рис. 4–5).

Тарировку тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням проведено в повному обсязі.

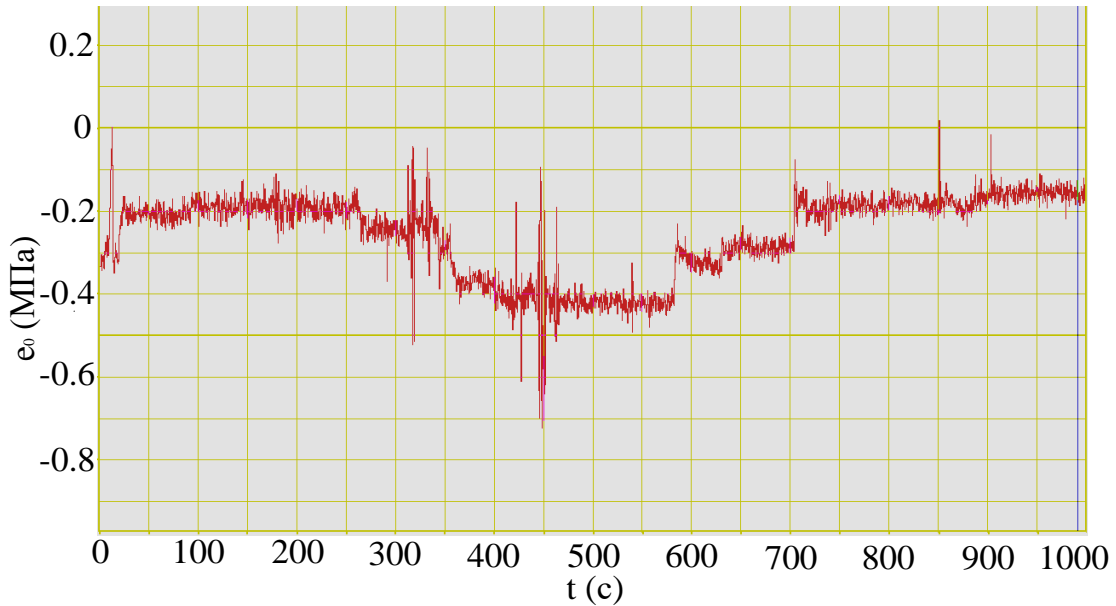


Рис. 3. Напруження в мосту крана, отримані експериментальним шляхом з використанням АЦП ZetLab 210

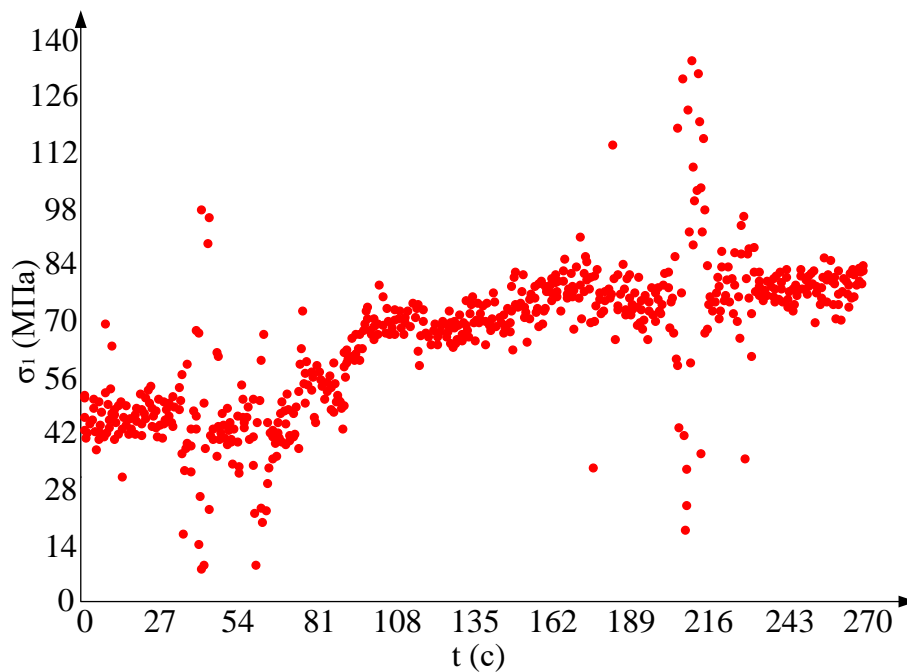


Рис. 4. Графік напружень в мосту крана під час підйому вантажу від 0,0 до 3,5 т

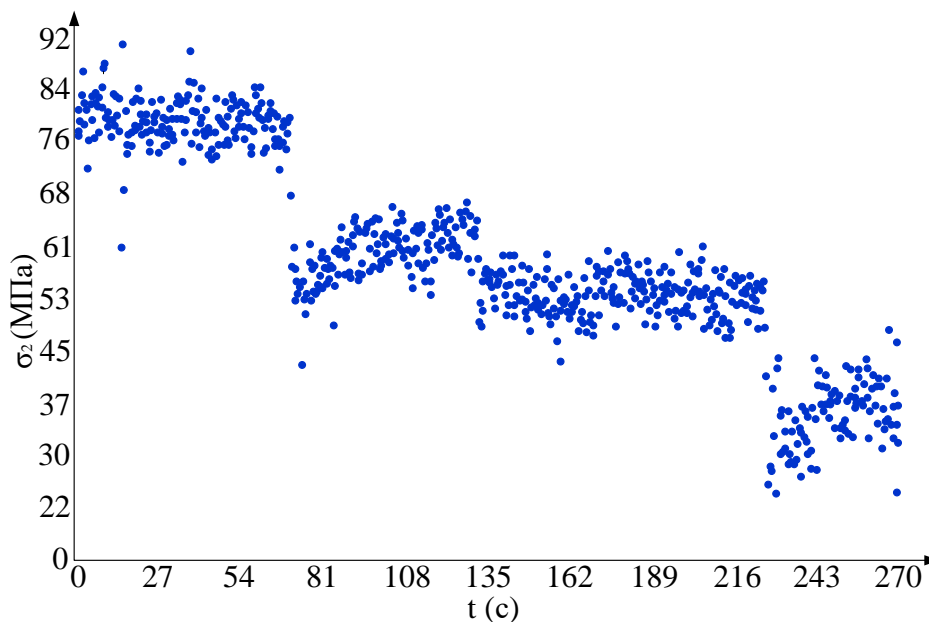


Рис. 5. Графік напружень в мосту крана під час опускання вантажу від 3,5 до 0,0 т

З урахуванням середніх значень при підйомі і опусканні вантажу в досліджува-

ній деталі (мосту крана) виникали механічні напруження, відображені в таблиці.

Таблиця

Механічні напруження в досліджуваній деталі (мосту крана) під час підйому та опускання вантажу

Маса вантажу, тонн	Напруження під час підйому вантажу, МПА	Напруження під час опускання вантажу, МПА
0	28	28
0,5	35	37
1	46	42
1,5	56	52
2	60	58
2,5	66	67
3	77	72
3,5	92	90

За результатами усереднених значень напружень під час підйому і опускання вантажу побудуємо тарувальну криву (рис. 6).

За графіком тарировки тензорезисторів бачимо, що вимірюваль-

но-реєструвальне обладнання та програмне забезпечення дає змогу в реальному часі будувати функціональні залежності між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом вимірювально-реєструвального обладнання.

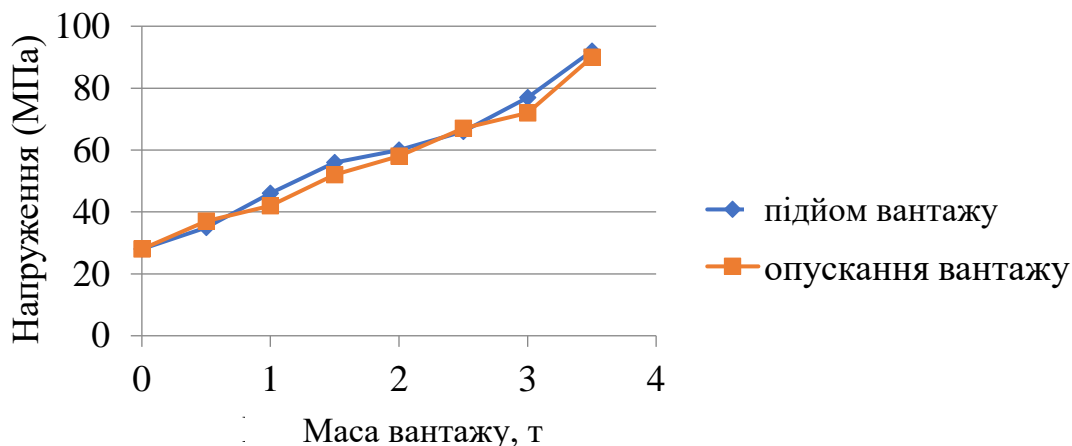


Рис. 6. Тарувальна крива

За допомогою графіка тарировки, під час подальших експериментальних досліджень, отримані дані напруженого стану в деталі з електричних сигналів напружень мілівольтів (мВ) можна перерахувати в механічні мегапаскалі (МПа).

Висновки. Тарировка тензорезисторів у комплексі з вимірювально-реєструвальним обладнанням виконана в повному обсязі.

Вибране вимірювально-реєструвальне обладнання, програмне забезпечення, що входить до складу вимірювального комплексу, дає змогу в реальному часі будувати функціональні залежності між навантаженням, що діє на випробовувану деталь, і вихідним сигналом вимірювально-реєструвального обладнання.

Список використаних джерел

1. Nischeta S. A., Chernyshova E. P., Narkevich M. Y., Krishan A. L., Sagadatov A. I. Damage of bridge lifting cranes and crane metal structures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. №12 (23). P. 6587–65890. URL: <https://www.researchgate.net/publication/325416488>.
2. Antsev V. Y., Tolokonnikov A. S., Vorobev A. V., Sakalo V. I. Methods of determining the margin of cyclic crack resistance of metal structures for hoisting machinery. *Materials Science and Engineering*. 2017. №177. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012096>.
3. Marazania T., Madyiraa D., Akinlabi E. Repair of cracks in metals: A review. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 8. P. 673–679. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.086>.
4. Yifei T., Zhihao G., Xingcheng Z., Guomin S., Dongbo L., Xiangdong L. Research on welding deformation for box girder of bridge crane based on thermal elasto-plastic theory. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10 (5). P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1177/1687814018775885>.
5. Spruogis B., Jakstas A., Turla V., Iljin I., Sesok N. Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting. *TRANSPORT*. 2011. Vol. 26 (3). P. 279–283. URL: <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.622144>.
6. Kishor K., Namesh K. Study on control of cracks in a Structure through Visual Identification & Inspection. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. Vol. 11 (5). P. 64–72. URL: <https://doi.org/10.9790/1684-11566472>.
7. Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д. Визначення оптимальних параметрів ходових коліс мостових кранів. *Науковий вісник будівництва*. 2012. Вип. 69. С. 215–222. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7436>.

8. Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д., Чернишенко О. В. Міцність трьохшарової циліндричної оболонки. *Науковий вісник будівництва*. 2015. Вип. 1 (79). С. 190–193. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7456>.
9. Ступницький В. В., Долиняк Я. В. Дослідження залишкових напружень та деформацій методом ультразвукової акустичної тензометрії. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: зб. наук. праць. 2015. № 822. С. 58–66.
10. Fidrovska N., Slepuzhnikov E., Varchenko I. Preparation of tensoresistors and measuring equipment for experimental research. *Norwegian Journal of development of the International Science. Technical Sciences*. 2020. № 45. Vol. 1. P. 69–72. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11233>.
11. Слепужніков Є., Варченко І., Фідровська Н. Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії: матеріали конференцій МЦНД, 2020. С. 85–86. URL: <https://doi.org/10.36074/01.05.2020.v2.10>.
12. Pastor M., Trebuna F., Lengvarsky P., Bocko J. Possibility of using of tensometry in deformation analysis in areas with sudden change of geometry. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2016. №4 (7). P. 36–367. URL: <https://www.researchgate.net/publication/313108265>.
13. Tutak P. Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects. *JACSM*. 2014. №6 (2). P. 135–145. URL: <https://doi.org/10.1515/jacsm-2015-0004>.
14. Ghimbaseanu I. Experimental research study on the use of a resistive tensometric. *International Scientific Journal: Machines. Technologies. Materials*. 2015. №9 (1). P. 44–47. URL: <https://stumejournals.com/journals/mtm/2015/1/44>.
15. Pastor M., Carak P., Gomory I. The assessment of the residual stresses influence on generation of the infringement in shape-complex supporting members. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. №69 (1). P. 85–96. URL: <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0007>.
16. Динамометр ДПУ-10-2. URL: <http://standart-m.com.ua/> URL: <http://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/dinamometry/dinamometry-dpu/dinamometry-dpu-10-2?mova=uk> (дата обращения: 01.12.2020).

Фідровська Наталія Миколаївна, доктор техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID iD: 0000-0002-5248-273X. Тел.: +38(097) 396-98-83. E-mail: nfidrovskaya@ukr.net.

Пономаренко Роман Володимирович, доктор техн. наук, с.н.с., заступник начальника кафедри пожежної та рятувальної підготовки Національного університету цивільного захисту України. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>. Тел.: +38(066)-029-71-21. E-mail: prv@nuczu.edu.ua.

Слепужніков Євген Дмитрович, кандидат техн. наук, викладач кафедри спеціальної хімії та хімічної технології Національного університету цивільного захисту України. ORCID iD: 0000-0002-5449-3512. Тел.: +38(067)922-99-14. E-mail: ors2011@ukr.net.

Козодой Дмитро Сергійович, кандидат техн. наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-3615-1815. Тел: +38(066)519-47-31. E-mail: Dmitry_1980@ukr.net.

Fidrovska Nataliia, Dr. Sc. (Tech.), professor of the department of construction and road machines, Kharkiv national automobile and road university. ORCID iD: 0000-0002-5248-273X. E-mail: nfidrovskaya@ukr.net.

Ponomarenko Roman, Dr. Sc. (Tech.), Deputy Head of the Department of fire and rescue training National university of civil defence of Ukraine. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6300-3108>. Email: prv@nuczu.edu.ua.

Slepuzhnikov Evgen, PhD (Tech.), lecturer at the department of special chemistry and chemical technology of the National university of civil defense of Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-5449-3512. E-mail: ors2011@ukr.net.

Kozodoi Dmytro, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of labor protection and environment, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-3615-1815. E-mail: Dmitry_1980@ukr.net.

Статтю прийнято 24.11.2020 р.

УДК 621.793.620.172

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Канд. техн. наук М. С. Агеєв, доктори техн. наук І. В. Грицук, Е. К. Солових

APPLICATION OF COMBINED TECHNOLOGY FOR RENOVATION AND INCREASED RESOURCE DETAILS OF MEANS OF TRANSPORT

PhD (Tech.) M. Ahieiev, Dr. Sc. (Tech.) I. Gritsuk, Dr. Sc. (Tech.) E. Solovykh

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230412>

Анотація. Подано поєднання різних первинних технологій нанесення багатофункціональних покриттів для відновлення та підвищення ресурсу деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту. В даний час перспективними є комбіновані методи нанесення багатофункціональних покриттів (інтегровані, гібридні технології), методи нанесення покриттів у поєднанні з методами модифікування, нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів; розвиток комбінованих (інтегрованих, гібридних) багатоопераційних технологій. В умовах зростаючого дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей і вимагають високого комплексу властивостей міцності, перспективними є комбіновані методи відновлення поверхонь.

Ключові слова: інтегровані технології, гібридні технології, електродугове напилення, електроіскрове легування, іонне азотування в імпульсному режимі.

Abstract. It presents various combinations of primary hardfacing technology for the renovation and improvement of the resource details of ship machinery. Currently, promising are integrated or combined methods hard facing (hybrid technology) coating in conjunction with the modification, the application of multi-layer, multi-functional coatings; development of integrated multioperational technologies. In all conditions, increasing scarcity of expensive alloying materials included in the composition of steels requiring high strength properties of the complex, are promising hybrid technology peening (restore) the surfaces of mild steel

Combinations of various primary technologies of application of multipurpose coverings for restoration and increase of a resource of details of knots and units of vehicles are presented. Currently promising are combined methods of application of multifunctional coatings (integrated, hybrid technologies), methods of coating in combination with methods of modification, application of multilayer, multifunctional coatings; development of combined (integrated, hybrid) multi-operational technologies. In the conditions of growing shortage of expensive alloying materials which are a part of the steels demanding a high complex of properties of durability, the combined methods of restoration of surfaces are perspective.

At present, a methodology for the synthesis of combined multi-operational technologies has not been developed. An empirical-intuitive approach prevails in the combination of multifunctional coating restoration methods. The optimal choice of restoration methods and their sequence is determined by the increase of hardness, complex of mechanical properties, wear resistance, as well as the roughness of the restored surface and the accuracy of the dimensions of the restored part. In the first-best case of combined (hybrid) methods of recovery, the criterion of choice is the comparison of costs and increase the set of mechanical properties of the recoverable parts of components and units of vehicles [13-14].

Each method of recovery has its niche of optimal conditions of use, including even the technological traditions that have developed in a particular enterprise. The decisive factor in the choice of primary methods of applying multifunctional coatings in the combined restoration process is the presence of certain types of equipment at the enterprise and the ability to integrate them into a single technological cycle. In order to restore vehicle parts with multifunctional coatings with high adhesion strength, hardness and wear resistance, we have proposed a combined (integrated) technology that includes electric arc spraying, electrospark doping and pulsed ion nitriding.

Key words: *integrated technology, hybrid technology, electric arc spraying, electric-spark doping, ion nitriding temperature cycling.*

Вступ. Розвиток сучасного вітчизняного транспорту (автомобільного, водного, морського, авіаційного та іншого призначення) нерозривно пов'язаний з проблемою підвищення довговічності деталей його вузлів та агрегатів. Більшість відмов засобів транспорту відбувається в результаті поверхневого руйнування і в першу чергу від зношування. Причиною, яка зумовлює зниження надійності робочих параметрів транспортних засобів, є знос їх деталей. Ремонтні транспортні підприємства витрачають більше 40 % металу на виготовлення запасних деталей різних вузлів та агрегатів засобів транспорту (ЗТ). Знос поверхонь деталей, що сполучаються, знаходиться в межах 0,5 ... 2,0 мм [1–4]. Розробку ефективних способів боротьби із зносом, збільшення довговічності деталей з метою підвищення ресурсу засобів транспорту можна віднести до однієї з важливих проблем транспортної галузі [1–4].

Дослідження у галузі тертя, зношування і принципово нових матеріалів та багатофункціональних покриттів є передумовою для створення на цій основі нових способів і технологій відновлення та ремонту деталей вузлів та агрегатів ЗТ, спрямованих на вирішення питань збільшення довговічності їх швидкозношуваних деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із шляхів підвищення працездатності деталей ЗТ і захисту контактних поверхонь від зносу і корозії є нанесення багатофункціональних покриттів на їх робочі поверхні [5]. Характерною особливістю технологій нанесення

покриттів є те, що не вдається отримати одночасне підвищення всіх властивостей деталі для всіх режимів експлуатації. Навіть один і той самий матеріал покриття, але нанесений різними способами, показує різні експлуатаційні властивості. Для усунення цього недоліку при проектуванні покриттів використовують два методи [6]:

1) створення багатошарових покриттів аж до мультиплікації; кожен шар у багатошаровому покритті виконує власну функцію і забезпечує плавний перехід фізико-механічних властивостей від поверхні покриття до відновлюваної поверхні деталі;

2) створення багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині покриття.

Обидва методи значно здорожують технологію отримання покриття і знижують надійність отримання покриття високої якості, так як брак в одному з шарів призводить до зниження якості всього покриття.

У спробах усунення недоліків цих методів отримання покриттів спостерігаються дві основні тенденції [6]:

- нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів;

- розвиток комбінованих (інтегрованих, гібридних) багатоопераційних технологій.

З комбінованих (інтегрованих) технологій найбільший ефект за несучою здатністю забезпечують дуплексні покриття, що поєднують попереднє глибоке іонне азотування і зовнішній тонкий шар надтвердого вакуум-плазмового покриття. Така комбінована технологія забезпечує 10-кратне підвищення довговічності клапанів, які виготовлені зі сталі 12X18H10T і

експлуатуються в умовах високих контактних тисків і агресивних технологічних середовищах [6]. Знаходять застосування комбіновані (інтегровані) технології у комбінації лазерного легування (ЛЛ) і хіміко-термічної обробки (ХТО) [7-8]. Ця комбінація дозволяє отримувати за рахунок утворення зміцнюючих дисперсних фаз твердість до 20 ГПа і призводить до збільшення зносостійкості в 1,5–3 рази в порівнянні з азотованими нітрошарами сталі 38Х2МЮА [9]. Азотований шар, попередньо легований хромом (Cr) і ванадієм (V), має твердість 16–18 ГПа. Лазерне легування алюмінієм забезпечує сильно розвинену полігонізовану структуру, що прискорює дифузію азоту. При цьому твердість досягає 21 ГПа [10]. У порівнянні з технологіями газового азотування (ГА) або дискретно-лазерною обробкою (ЛО) зносостійкість за допомогою такої комбінованої (інтегрованої) технології підвищується в 2,5 рази [11]. Попередня дискретна лазерна обробка робить істотний внесок у процес подальшого газового азотування [11]. При цьому якісний і кількісний характер змін в азотованому шарі визначається заздалегідь сформованим структурно-фазовим станом. Підвищена розчинність азоту в кристалічній решітці сталі при обробці її поверхні лазерним променем є наслідком утворення високої щільності рухомих дислокацій, а також сильного диспергування вихідної структури зерен. При цьому процес насичення поверхні азотом прискорюється в 17 разів [12].

Перспективним є відновлення комбінованими методами нанесення багатофункціональних покриттів, нанесення покриттів з їх механічною обробкою (МО), нанесення покриттів з модифікуванням відновлюваних поверхонь тощо [13–14]. Комбіноване відновлення деталей засновано на використанні двох або трьох методів відновлення, кожен з яких дозволяє підвищити їхні експлуатаційні властивості. Застосовують комбінації наплавлення і хромування [13–14],

наплавлення і поверхневого пластичного деформування (ППД) [13–14], газотермічне напилення (ГН) з оплавленням [15–16]. Використовують комбінацію гальванічних покриттів і подальшу хіміко-термічну обробку [17–18], двошарове хромове покриття з наступною механічною обробкою [13–14]. Підвищують триботехнічні характеристики композиційних електролітичних покриттів лазерною обробкою [19], ультразвуковою обробкою (УЗО) [13–14], іонним азотуванням (ІА) [18]. При ультразвуковій обробці розмір зерен в покритті залежить від інтенсивності обробки, змінюючись від 45 до 24 нм [13–14]. Іонне азотування підвищує зносостійкість при абразивному зношуванні за рахунок перетворення електрично-осажденного хрому (Cr) в нітрид хрому (Cr_2N) [17–18]. Визначено механізм впливу термообробки (ТО) на зміцнення електрично-осажденного Fe-V-покриття, що забезпечує підвищення зносостійкості [17–18]. Технологія відновлення зношених деталей електролітичним залізненням з подальшою нітроцементациєю забезпечує високі експлуатаційні характеристики: міцність зчеплення, зносостійкість, втомну міцність [17]. Ефективним є сульфювання електрично-осажденного Fe-V-покриття, що забезпечує підвищення зносостійкості і зниження коефіцієнта тертя [13–14]. Комбінація лазерної обробки з іонним азотуванням істотно збільшує здатність сталей до азотування, глибину зміцненої зони і підвищує зносостійкість [9], забезпечує підвищення твердості в порівнянні з іонним азотуванням. Електроіскрове легування, як і лазерні технології, належить до способів, які використовують висококонцентровані джерела енергії. Тому ефективною є комбінація електроіскрового легування з подальшим іонним азотуванням [5–6]. Цим істотно збільшується глибина шарів підвищеної твердості. А ось комбінація лазерної (ЛО) та електроіскрової обробки забезпечує незначний ефект [5–6].

Зазначають істотне підвищення зносостійкості модифікуванням відновлюваних поверхонь з покриттями шляхом поєднання методів іонної, електронно-променевої і лазерної обробки [5, 6]. У комбінаціях технологій електроіскрової, лазерної та електронно-променевої обробки з іонним азотуванням спостерігається ефект неадитивної.

Попередня обробка цими первинними технологіями істотно збільшує здатність сталей до азотування, глибину зміцненого шару і забезпечує багаторазове підвищення твердості і зносостійкості в порівнянні з іонним азотуванням.

За даними Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона, в США і Західній Європі комплексні або комбіновані методи нанесення покриттів отримали назву «гібридні процеси» зміцнення [6]. У даний час у практиці відновлення застосовуються такі «гібридні процеси» [5–6], що поєднують:

- хіміко-термічну обробку з поверхневим пластичним деформуванням (азотування з наклепом дробом, азотування з холодним накатуванням, цементування з поверхневим пластичним деформуванням, зокрема наклепом дробу);

- хіміко-термічну обробку з наступною електроконтактною обробкою (легування бором і вуглецем з подальшою електроконтактною обробкою);

- волочіння при впливі імпульсів струму (волочіння з електричним стимулюванням);

- газотермічне напилення з подальшою холодною прокаткою;

- електромагнітне наплавлення з термомеханічною обробкою;

- поверхнєве пластичне деформування з дифузійним насиченням (прокатка з дифузійним насиченням при газовій цементації);

- поверхнєве пластичне деформування з пічним нагрівом або електричним (струменеву обробку дробом з електричним нагріванням);

- поверхнєве пластичне деформування з електрично-імпульсною обробкою (електрично-імпульсне деформування при прокатці);

- поверхнєве пластичне деформування з мікродуговим оксидуванням;

- лазерне гартування з поверхневою пластичною деформацією;

- плазмове напилення з гарячим ізостатичним пресуванням;

- газотермічне напилення з вібраційною обробкою або нагріванням;

- цементацію з подальшим струменевим зміцненням дробом;

- лазерне гартування або легування з поверхневою пластичною деформацією;

- лазерне легування з ультразвуковою обробкою;

- ультразвукову обробку з нанесенням газотермічних покриттів;

- лазерну обробку з плазмовим напиленням покриттів;

- електронно-променеву обробку електролітичних хромових покриттів;

- електронно-променеве нагрівання з детонаційним напиленням покриттів;

- лазерну обробку з іонним азотуванням;

- лазерну обробку з боруванням;

- цементацію з лазерним гартуванням;

- лазерне легування з хіміко-термічною обробкою.

Визначення мети та завдання досліджень. Дати характеристику комбінованих технологій відновлення, а також показати перспективу їх розвитку. Запропонувати комбінований спосіб підвищення ресурсу та відновлення деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту.

Для досягнення визначеної мети потрібно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту;

- запропонувати спосіб первинної обробки відновлюваної поверхні для підвищення міцності зчеплення;

- для відновлення та підвищення ресурсу деталей вузлів та агрегатів транспортних засобів запропонувати комбіновану технологію електродугового напилення в комбінації з електроіскровим легуванням і імпульсним іонним азотуванням.

Основна частина дослідження. В даний час ще не розроблена методологія синтезу комбінованих багатоопераційних технологій. У комбінації методів відновлення багатофункціональними покриттями переважає емпірично-інтуїтивний підхід.

Слід зазначити явище інверсії, коли зміна послідовності операцій відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів призводить до результатів, які відрізняються. Оптимальний вибір методів відновлення та їх послідовність визначається підвищенням твердості, комплексу механічних властивостей, зносостійкості, а також шорсткості відновлюваної поверхні і точності розмірів відновлюваної деталі. Попередню хіміко-термічну обробку доцільно використовувати для підготовки поверхні під електроіскрове легування, а фінішне електроіскрове легування цементованих і азотованих поверхонь забезпечує додаткове підвищення твердості і зносостійкості [5–6]. Різна послідовність електроіскрового легування і азотування дозволяє управляти розподілом мікротвердості в легуваному шарі, а саме – становищем максимуму в приповерхневому шарі [5–6]. Зауважують інверсію в комбінації лазерної обробки і іонного азотування [9]. Лазерна обробка азотованого шару забезпечує більш щільний оксинітридний шар під відновлюваною поверхнею, а також збільшення глибини азотованого шару [5, 9]. У наноструктурованому поверхневому шарі після шліфування азотований шар удвічі товщий, ніж на крупнозернистій поверхні в тих же умовах азотування, що пояснюється прискоренням дифузії азоту уздовж границь зерен в наноструктурному матеріалі поверхневого

шару, що відновлюється [9]. Фінішна струменева обробка дробом азотованого шару підвищує зносостійкість і межу витривалості зубчастих передач [20].

У першій-ліпшій нагоді комбінованих (інтегрованих, гібридних) методів відновлення критерієм вибору є порівняння витрат і збільшення комплексу механічних властивостей відновлюваних деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту [13–14].

Кожний метод відновлення має свою нішу оптимальних умов використання, включаючи навіть технологічні традиції, що склалися на конкретному підприємстві. Вирішальним фактором у виборі первинних методів нанесення багатофункціональних покриттів у комбінованому процесі відновлення є наявність на підприємстві окремих видів устаткування і можливість інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл.

З різноманіття первинних методів нанесення багатофункціональних покриттів – наймасовіші технології, що застосовуються в ремонті – газотермічні методи напилення [21–23]. Упровадження газотермічних методів напилення на ремонтних підприємствах почало розвиватися в кінці 80-х років минулого століття. У галузі ремонту транспортних засобів у 80-ті роки створювалися ділянки з відновлення деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту плазовими, детонаційними, газополумєневими і електродуговими покриттями. Однак у 90-ті роки у зв'язку зі зміною економічного становища в Україні впровадження газотермічного напилення при відновленні деталей ЗТ практично припинилося. Плазове і детонаційне напилення, на яке робилася основна ставка в підвищенні ресурсу деталей вузлів та агрегатів ТЗ, вимагало великих витрат: висока вартість обладнання, застосування дорогих газів. Відсутність достатнього науково-технологічного забезпечення і кваліфікованих кадрів призвела практично до зупинки робіт з відновлення деталей методами газотермічного напилення. За кордоном в цей час інтенсивно проводилися роботи із

застосування методів ГТН, розроблялось нове обладнання для напилення, наприклад, надзвукові системи, за допомогою яких отримують покриття з високою міцністю. Вартість цих систем у 5...10 разів перевищує номінальну вартість серійного обладнання вітчизняного виробництва.

Апарати для електродугового напилення вітчизняного виробництва відрізняються простотою, дешевизною і високою продуктивністю [24]. У зв'язку з цим упровадження електродугового напилення для підвищення ресурсу та відновлення деталей ЗТ з метою забезпечення змінно-запасними частинами ремонтних підприємств є актуальним.

Електродугове напилення може бути застосовано для відновлення зношених чавунних, високовуглецевих і високолегованих сталевих деталей циліндричної форми зі зношеними посадочними місцями і деталей плоскої форми з кольорових металів, які працюють в умовах тертя ковзання і мастила, захисту від корозії зовнішніх і внутрішніх поверхонь резервуарів і зварних металоконструкцій різного призначення шляхом напилення алюмінієм і цинком [24]. Методом електродугового напилення відновлюються розміри опорних шийок розподільних і колінчастих валів двигунів внутрішнього згоряння [25].

Високі властивості покриттів при електродуговому напиленні досягаються застосуванням композиційних порошкових дротів. До них можна віднести порошковий дріт ФМІ, розроблений у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів, Україна) [26–27]. Захист від окиснення і високі властивості відновлюваних поверхонь з цими покриттями досягаються за рахунок взаємодії компонентів порошкової шихти між собою, при цьому відбуваються процеси відновлення оксидів і легування сталеві основи. При ЕДН технологічно можливе застосування будь-якої марки дроту, що випускається промисловістю для різних цілей. Однак найчастіше

застосовують композиційні порошкові дроти, оболонка яких виготовлена зі сталей Св08, Св08Г2С, 30ХГСА, сталь 70, У8, У10, 20Х13, 40Х13, 65Г, а наповнювач – феросплави, карбіди, карбобориди. Відновлювані поверхні з покриттями, отриманими напиленням порошкових дротів, мають велику твердість і зносостійкість. Практика застосування порошкових композиційних дротів при відновленні електродуговим напиленням показує, що експлуатаційні властивості відновлюваних поверхонь з покриттями із порошкових дротів вище, ніж з гомогенних. Переваги порошкових дротів обумовлюються не тільки гетерогенною структурою відновлюваної поверхні з покриттям після напилення, а й активною взаємодією компонентів порошкової шихти один з одним при напиленні і з відновлюваною поверхнею, що сприяє підвищенню температури частинок, розкисненню оксидів на відновлюваній поверхні і, як наслідок, підвищенню адгезії покриття до поверхні деталі. Однак таке зменшення розмірів розплавлених частинок напилюваного матеріалу веде до менш інтенсивного вигорання з них легуючих елементів, у першу чергу вуглецю, що обумовлює підвищену твердість покриттів. Наші дослідження показали, що підвищення вмісту вуглецю в композиційному дроті, що розпилується, сприяє підвищенню механічних властивостей відновлюваної поверхні з покриттям.

При напиленні маловуглецевих нелегованих дротяних матеріалів покриття має низький рівень механічних властивостей. Твердість металу і оксидів різна і становить 210 ... 280 НV і 400 ... 560 НV відповідно. Покриття характеризується високою внутрішньою крихкістю через наявність великої кількості оксидів (до 20 %), високим коефіцієнтом тертя ($f = 0,4...0,6$) і невисокою зносостійкістю [27]. Міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею деталі не перевищує 22 ... 24 МПа. Пористість покриття знаходиться в

діапазоні 13...18 %. Структура покриттів має вигляд шаруватої системи, що складається з витягнутих зерен (ламелей), фазовий склад яких відповідає твердому розчину хрому в α -залізі з дисперсними включеннями складнолегованих боридних сполук хрому і заліза.

Використання легованих та високолегованих матеріалів дає змогу отримувати найкращі властивості покриттів з гомогенних дротяних матеріалів методом електродугового напилення [29]. Отримання покриттів з підвищеними властивостями обумовлено зміцнювальною дією легуючих елементів у сталі. При значному вмісті хрому у вихідному дроті в покритті утворюються карбіди $Cr_{23}C_6$, а також невелика кількість аустеніту. Хром у значній мірі підвищує корозійну стійкість покриття, а також адгезію покриття до мастила. На міцність зчеплення покриттів хром у чистому вигляді впливу не надає. При електродуговому напиленні хром практично не вигоряє. Нікель широко застосовують у сплавах для захисних покриттів, він необмежено розчинний у залізі і є сильним аустенізуючим елементом. Власних високотвердих фаз у сплавах заліза нікель не утворює. Його вплив полягає в істотному підвищенні стійкості покриттів до ударних навантажень. Зі збільшенням вмісту нікелю підвищується в'язкість сплаву практично без шкоди для зносостійкості. Нікель – дорогий легуючий елемент, тому його кількість у зносостійких сплавах на основі заліза обмежують. Виняток становлять сплави для корозійно-стійких покриттів, у яких нікель застосовують як основу сплаву. В цьому випадку досягаються високі корозійна стійкість і зносостійкість, а також технологічність нанесення покриття завдяки утворенню в системі М-Сr-В гетерогенної структури евтектичного типу з низькою температурою плавлення (менше 1000 °С). Однак високолеговані дровові матеріали за вартістю наближаються до порошкових дровових матеріалів.

Головні недоліки напилених покриттів – низька міцність зчеплення і висока пористість [28–29]. Покращують ці властивості лазерною, електронно-променевою і хіміко-термічною обробкою [30–38]. Найбільш численні дослідження – з лазерної обробки покриттів [30–33]. Проаналізовано галузі використання лазерного поліпшення властивостей напилених покриттів. Завдяки оптимізації параметрів лазерної обробки напилених електродугових покриттів отримують мікрокристалічну безпористу структуру з рівномірним розподілом хімічних елементів. Цим істотно підвищується зносостійкість в умовах граничного тертя і абразивного зношування. Досягають підвищення адгезійної і когезійної міцності покриттів при їх наноструктуруванні. Лазерна обробка напилених покриттів підвищує їхню стійкість до високотемпературної газової корозії і корозії у розплаві $V_2O_5 + Na_2SO_4$. З метою зниження енергетичних витрат використовують спосіб легування поверхні спільною обробкою лазерним променем і плазмою [34]. Лазерне оплавлення напилених покриттів збільшує мікротвердість у 2 рази, зносостійкість в 1,3–1,8 рази. Оплавлення напилених покриттів здійснюють струмами високої частоти, високошвидкісним імпульсно-плазмовим струменем, у вакуумних пічках [34–35]. Істотний ефект багаторазового підвищення мікротвердості і зносостійкості забезпечує електронно-променева обробка напилених покриттів [36–37]. Аналіз структури показав, що середній розмір зерна в покритті зменшується від сотень мікрометрів до сотень нанометрів, а мікротвердість збільшується в 5 раз. Межа витривалості підвищується на 60–80 %, а міцність зчеплення – у 2,5...3,5 рази після електронно-променевої обробки [36–37]. Для підвищення триботехнічних характеристик напилених покриттів використовують ультразвукову обробку, в тому числі одночасно з плазмовим

напиленням [29]. Ефективним є застосування хіміко-термічної обробки після напилення. Після борування зносостійкість напилених покриттів зі сталі Св-08 при сухому терті підвищується в 10 раз. Підвищується також адгезійна міцність напилених покриттів. Іонне азотування напилених покриттів із сталей 40Х13 і Х18Н10Т забезпечує їхню мікротвердість від 6,5 до 15 ГПа. При цьому зносостійкість збільшилася у 8 разів [29].

В умовах зростаючого дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей і вимагають високого комплексу властивостей міцності,

перспективними для електродугового напилення є маловуглецеві низьколеговані сталі. При електродуговому напиленні відбувається вигорання вуглецю і зниження твердості і зносостійкості покриттів.

З метою використання при ЕДН дешевих сталей, але при цьому для отримання покриттів з високою міцністю зчеплення, твердістю і зносостійкістю нами була запропонована комбінована (інтегрована) технологія (рисунок) електродугового напилення попередньою електроіскровою обробкою (ЕІО) з подальшою їх фінішною обробкою іонним азотуванням в імпульсному режимі.



а



б



в



г



д



ж

Рис. Приклад комбінованого методу відновлення шляхом нанесення багатофункціональних покриттів: а, б – електроіскрове легування; в, г, д – електродугове напилення; ж – імпульсне іонне азотування

При відновленні деталей електродуговим напиленням необхідна попередня обробка відновлюваних поверхонь для видалення забруднень і забезпечення надійного контакту розпилюваного матеріалу покриття з матеріалом відновлюваної поверхні деталі. Попередня обробка відновлюваних поверхонь деталей виконується різноманітними технологічними методами. На першій стадії підготовки поверхні

проводиться знежирення для видалення різних забруднень. Далі виконується механічна обробка відновлюваних поверхонь для видалення дефектного шару. Після механічної обробки для підвищення адгезійної міцності напилених покриттів з відновлюваною поверхнею використовують обробку дробом, обдування піском, нарізання рваної різи, нанесення різної форми насічок (таблиця).

Таблиця

Вплив способів підготовки поверхні для напилення покриттів на міцність зчеплення і ефективний коефіцієнт концентрації напружень

Спосіб підготовки	Міцність зчеплення, МПа	Ефективний коефіцієнт концентрації напружень
Обробка дробом	20	0,78
Обдування піском	19	0,91
Нарізання рваної різи	23	1,3
Нанесення різної форми насічок	22	1,29
Електроіскрова обробка	23	1,08

При розробці комбінованої технології електродугового напилення (ЕДН) з подальшою обробкою іонним азотуванням в імпульсному режимі (ІА) була запропонована попередня обробка поверхонь перед напиленням електроіскровим легуванням або електроіскровою обробкою. Запропонований комбінований метод, що включає електроіскрове легування, електродугове напилення та імпульсне іонне азотування для відновлення деталей вузлів та агрегатів засобів транспорту, подано на рисунку.

Висновки. Як показує вітчизняний і зарубіжний досвід, відновлення деталей засобів транспорту найбільш ефективно шляхом нанесення на їх відновлювані поверхні багатофункціональних покриттів комбінованими (інтегрованими, гібридними) методами. Створення технологічних процесів відновлення комбінованими (інтегрованими, гібридними) методами є досить актуальним завданням і може

зробити ремонтне виробництво рентабельним.

Запропоновано для відновлення та підвищення ресурсу деталей вузлів та агрегатів транспортних засобів використовувати вперше розроблену комбіновану (інтегровану, гібридну) технологію електродугового напилення в комбінації з електроіскровим легуванням і імпульсним іонним азотуванням. Запропонована комбінована технологія має низку переваг:

- забезпечує підвищення фізико-механічних властивостей відновлюваної поверхні з покриттям, зокрема, міцність зчеплення покриття з відновлюваною поверхнею, щільність, твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. Електроіскрове легування несе функцію попередньої обробки відновлюваної поверхні перед напиленням покриття і підвищує його міцність зчеплення. Операцію імпульсного іонного азотування напиленого покриття можна поєднати з фінішною обробкою до

необхідної твердості, зносостійкості і чистоти відновлених поверхонь деталей;
- дає змогу зменшити вартість процесу відновлення деталей за рахунок зниження

вартості покриттів шляхом заміни дорогих порошкових дротів на дешевші низьколеговані вуглецеві сталеві дроти.

Список використаних джерел

1. Кузьмин А. А. Судостроение и судоремонт: сб. науч. трудов С.-Петербург. гос. ун-т вод. коммуникаций. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУВК, 2000. 189 с.
2. Бочкарев В. Н., Яхьяев Н. Я. Технологическая наследственность в управлении качеством судовых машин и механизмов: монография / Дагестанский филиал АН СССР. Махачкала, 1990. 200 с.
3. Половинкин В. Н. Новые высокие технологии на пути к внедрению в судостроении. Успехи ожидаемые и неожиданные: материалы конференции. Санкт-Петербург: «Моринтех», 2001. С. 9–10.
4. Сторожев В. П. Восстановление деталей судовых технических средств. *Судоремонт*. 1990. 1(17). С. 1–60.
5. Покрытия и их использование в технике: в кн. Прочность материалов и конструкций / под ред. В. Т. Трощенко. Изд 2-е. Киев: Академперіодика, 2006. С. 981–1074.
6. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытий / Б. А. Ляшенко, Л. А. Лопата, Е. К. Соловых, А. Е. Соловых, А. В. Ворона. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2011. Вип. 41. Ч. 2. С. 73–79.*
7. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазеро-хіміко-термічною обробкою / А. О. Корнієнко, М. С. Яхья, Н. В. Іщук та ін. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. Київ: НАУ, 2008. Вип. 49. Т. 2. С. 61–65.*
8. Лахтин Ю. М., Чудина О. В. Химико-термическая обработка лазернолегированных сталей. *Изв. вузов. Серия: Чер. металлургия*. 1997. № 9. С. 64–67.
9. Чудина О. В. Азотирование лазернолегированных сталей: сб. матер. 4 Собр. металлословесов России (Пенза, 23-25 сент., 1998). Пенза, 1998. Ч. 1. С.90–91.
10. Kunlin Wang, Zhirui Tian, Chongbin Yang et al. Повышение износостойкости сплавов Al-Si лазерной переплавкой. *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals*. 1994. № 10. С. 3–5.
11. Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко та ін. *Пробл. тертя та зношування: наук.-техн. зб. Київ: НАУ, 2008. Вип. 50. С. 5–15.*
12. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів: п ат. 25412 Україна, С23С 8/02. / Кіндрачук М. В., Іщук Н. В., Писаренко В. М. та ін. Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
13. Комбинированные электротехнологии защитных покрытий / В. С. Чередниченко, В. Г. Радченко, Т. Б. Радченко и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 260 с.
14. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов, В. Н. Машков, В. А. Смолянцев и др. Москва: Машиностроение, 1991. 114 с.
15. Подчерняева И. А. Лазерное оплавление газотермических покрытий на основе кортинита. *Технология и организация производства*. 1992. № 2. С. 42–43.
16. Голубев В. С., Иванов И. А., Чеботько И. С. Лазерное оплавление газотермических покрытий. *Разраб. и применение технол., оборуд. и матер. для газотерм. процессов нанес. защитн. покрытий: тез. науч.-практ. конф. (Минск, 5-6 июня, 1990)*. Минск, 1990. 38 с.

17. Чернявский Д. А. Повышение эксплуатационных характеристик железных электролитических покрытий нитроцементацией: автореф. дисс... канд. техн. наук. / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2007. 15 с.
18. Сафронов Р. И. Электроосаждение железобетонных покрытий и их термическая обработка: автореф. дисс... канд. техн. наук. / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2007. 17 с.
19. Семенова Н. Е., Игнатов М. Н. Методика нанесения композиционных электрохимических покрытий для лазерного модифицирования поверхности. *Вестн. ПГТУ. Мех. технол. матер. и конструкций*. 2003. № 6. С. 28–30.
20. Быковский Н. Г., Сорокина Л. М., Филимонов Г. Н. Повышение долговечности зубчатых передач совмещением азотирования и поверхностного пластического деформирования. *Нов. стали и сплавы, режимы их терм. обраб.:* матер. науч.-техн. семинар. / О-во «Знание» РСФСР. Ленингр. дом науч.-техн. проп. Ленинград, 1991. С. 34–35.
21. Дубчак В. С. Опыт Мурманского СРЗ по восстановлению деталей методами газотермического напыления. В/О «Мортехинформреклама». Серия: Судоремонт. Москва, 1987. Вып. 20. С. 1–10.
22. Корнев А. Б., Березин Е. К., Глебова М. А. Опыт применения газотермических покрытий при ремонте узлов трения крупногабаритного энергетического оборудования. *Компрессорная техника и пневматика*. 2002. № 11. С. 24–29.
23. Корнев А. Б. Разработка стратегии ремонта трибосопряжений крупногабаритных деталей с применением газотермического напыления в судоремонтном производстве: автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.08.04 / Корнев Андрей Борисович. Н.Новгород, 2006. 23 с.
24. Применение активированной электродуговой металлизации для нанесения антикоррозионных покрытий / Н. Н. Дорожкин, В. Э. Барановский, А. П. Елистратов, А. С. Прядко. *Морской транспорт*. Серия: Судоремонт. 1985. Вып. 2(531). С. 9–12.
25. Сергеев В. В., Спиридонов Ю. Л., Фарахшин И. И. Восстановление коленчатых валов отечественных и зарубежных дизельных двигателей электродуговой металлизацией. *Сварочное производство*. 2004. № 2. С. 44–26.
26. Порошковые проволоки систем FeCrV+Al и FeCrV+Al+C для электродуговой металлизации / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунук и др. *Автоматическая сварка*. 2002. № 3. С. 32–35.
27. Опыт применения порошковой проволоки ФМИ-2 для электрометаллизационного нанесения восстановительных покрытий / В. И. Похмурский, И. И. Сидорак, М. М. Студент. *Автоматическая сварка*. 2002. № 2. С. 3–4.
28. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление. Москва: Машиностроение, 1985. 239 с.
29. Витязь П. А., Азизов Р. О., Белоцерковский М. А. Упрочнение газотермических покрытий. Минск: Бестпринт, 2004. 192 с.
30. Похмурська Г. В., Довгунук В. М., Студент М. М. Зносостійкість лазерно-модифікованих электродугових поривів з порошкового дроту ФМІ-2. *ФХММ*. 2003. 39. № 4. С. 61–64.
31. Влияние лазерного воздействия на микроструктуру и фазовый состав плазменно-напыленных покрытий на основе никеля / В. А. Клименов, В. П. Безбородов, О. Б. Первалова и др. Прочн. и пластич. матер. в условиях внеш. энерг. воздействия: тез. докл. 4 Междунар. конф. (Новокузнецк, 11-16 сент., 1995). Новокузнецк, 1995. 292 с.
32. Анциферов В. Н., Шмаков А. М., Ившина Н. Н. Лазерная обработка плазменно-напыленных на порошковую сталь покрытий. *Порошк. металлургия*. 1992. № 10. С. 25–28.
33. Микроструктура плазменного покрытия на алюминиевом сплаве после лазерной обработки / Liang G., Li C., Su J. et al. *Chin. J. Nonferrous Metals*. 1998. 8. № 1. С. 28–32.

34. Станчков Д. И., Винокуров А. В., Бухтояров В. Н. Оплавление газотермических покрытий плазмотроном с модуляцией его параметров / Деп. в ВИНТИ 31.10.2001, № 2289-В2001.

35. Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучом / М. А. Глебова, А. Б. Корнев, В. В. Глебов и др. *Сварочное производство*. 2004. № 6. С. 3–46.

36. Шипко А. А., Урбан И. Г. Влияние электронно-лучевого нагрева на структуру и свойства детонационных покрытий. *Весці АН Беларусі*. Сер. фіз.-тэхн. н. 1992. № 4. С. 8-14.

37. Прохоренкова Н. В. Структура и свойства покрытий на основе Ni, нанесенных плазменном струей и подвергнутых электронному облучению. *Физика и химия наноматериалов*: сб. матер. междунар. школы – конф. мол. ученых (Томск, 13-16 дек., 2005). Томск: ТГУ, 2005. С. 118–120.

Агеев Максим Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5691-8986>. +380955871309. E-mail: maxageev73-73@ukr.net.

Грицук Ігор Валерійович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7065-6820>. +380666983739. E-mail: griksuk_iv@ukr.net.

Солових Євген Костянтинівич, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету. ORCID: 0000-0002-6561-6974. +380973974433. E-mail: ekskntu09@gmail.com.

Ahieiev Maksym, PhD (Tech). Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, department of ship power plant operation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5691-8986>. +380955871309. E-mail: maxageev73-73@ukr.net.

Griksuk Igor, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of Kherson State Maritime Academy, department of ship power plant operation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7065-6820>. +380666983739. E-mail: griksuk_iv@ukr.net.

Evgen Solovykh, Dr. Sc. (Tech.), professor, department of operation and repair of machines Central Ukrainian National Technical University. ORCID: 0000-0002-6561-6974. +380973974433. E-mail: ekskntu09@gmail.com.

Статтю прийнято 26.11.2020 р.