



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 204

Харків 2023

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <https://bit.ly/3vVHlv3>.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

Реферативна база

«Наукова періодика України»: <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 4 від 21 червня 2023 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20, Rue
Bachumont, 75002 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2023.

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)
Путятю 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)
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Bureika 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-
Universitet 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)
Онопрейчук 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 (ДБТУ)
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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Алфьоров О. І.* Комплексний підхід при оцінюванні показників надійності елементів технічних систем при виникненні деградаційних відмов 6

Теплоенергетика (144)

- Дешико В. І., Наумчук О. С.* Оцінка ефективності варіантів модернізації теплозабезпечення та теплового захисту офісної будівлі 12

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Фенко О. Г., Митрофанов П. Б., Крупченко О. А., Юрко П. А., Фенко Д. О.* Вплив власних напружень на міцність бетону при стиску в часі 27
- Плугін А.А., Борзяк О. С., Плугін О. А., Крикун О. П., Зінченко В. В.* Розвиток уявлень про електрокорозію конструкцій залізничної колії та удосконалення способів їхнього захисту з застосуванням електропровідних композицій 35

Залізничний транспорт (273)

- Візняк Р. І.* Визначення параметрів напружено-деформованого стану піввагона при розвантаженні роторним вагоноперекидачем 53
- Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Залата А. С., Мацегора Д. О., Лагерева О. В., Васильєв М. В.* Вибір варіантів характеристик локомотивів з урахуванням оптимальної ефективності 62

Транспортні технології (275)

- Гаєвський В. В.* Методологічні аспекти формування кількісних оцінок безпеки автоматизованих систем керування залізничного транспорту з застосуванням підходів ризик-менеджменту 78
- Мельник О. М.* Моделювання взаємозв'язку енергоефективності та безпеки судна на основі множинної лінійної регресії 92
- Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А., Синявський А. В., Шелест Д. А.* Огляд конфігурацій і стратегії керування мікромережами на основі силової електроніки 101
- Бутенко В. М., Головка О. В., Чуб С. Г.* Аналіз методик розрахунку надійності систем залізничної автоматики з електронними компонентами 115
- Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A.* Increasing the energy indicators of converters of electric vehicle charging stations 124

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 62-192÷621

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ПРИ ОЦІНЮВАННІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ВИНИКНЕННІ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ВІДМОВ

Д-р техн. наук О. І. Алфьоров

A COMPLEX APPROACH IN ASSESSING RELIABILITY INDICATORS OF ELEMENTS OF TECHNICAL SYSTEMS WHEN DEGRADATION FAILURES OCCUR

Dr. Sc. (Tech.) Oleksiy Alforyov

***Анотація.** У статті наводиться досить зручний при вирішенні багатьох завдань механічної надійності спосіб опису нестационарного монотонного деградаційного процесу, що полягає в задаванні виду його функції або щільності розподілу в перерізах часу з параметрами – детермінованими монотонними функціями часу або напрацювання в циклах навантаження.*

Розглянутий теоретичний аналіз основних деградаційних процесів, що визначають механічну надійність елементів машин, дав змогу розробити універсальний підхід до побудови комплексу стохастичних моделей надійності, що забезпечує можливість спільного статистичного оцінювання параметрів моделей для процесів, зумовлених зношуванням і втомним руйнуванням. Практичне використання пропонованого комплексу моделей механічної надійності є доцільним як при прискореному оцінюванні, так і прогнозуванні надійності на стадії ресурсного проектування елементів мобільних машин.

***Ключові слова:** механічна надійність, прогнозування, деградаційні відмови, зношування, втомне руйнування.*

***Abstract.** The construction and practical use of complexes of mechanical reliability models creates real prerequisites for the transition to resource design of assembly units and aggregates of mobile machines. Therefore, the article solves the tasks of building complexes of inverted stochastic models, which provide the possibility of joint statistical analysis of heterogeneous information about reliability in cases of types of destruction typical for machine elements: during wear and fatigue.*

A fairly complete and convenient method for solving many problems of mechanical reliability is given for describing a non-stationary monotonic degradation process, which consists in the task of the type of its function or the density of distribution in time segments with parameters that are deterministic monotonic functions of time or working time in load cycles. Such functions should be perceived as parametric.

Schemes of models of two main types of degradation processes in machine elements are also given: monotonically increasing, associated with wear and monotonically decreasing, due to fatigue failure. At the same time, the process corresponding to wear is formed by random realizations of a change in the failure parameter over time, and the process characterizing fatigue failure is formed by a set of random individual fatigue curves that depend on cyclic durability.

The considered theoretical analysis of the main degradation processes that determine the mechanical reliability of machine elements made it possible to develop a universal approach to

building complexes of stochastic reliability models, which provides the possibility of joint statistical evaluation of model parameters for processes caused by wear and tear and fatigue destruction. The practical use of the proposed complexes of mechanical reliability models is expedient both for accelerated assessment and for predicting reliability at the stage of resource design of elements of mobile machines.

Keywords: *mechanical reliability, prediction, degraded failures, wear, fatigue failure.*

Вступ. Деградаційні механічні відмови деталей належать до категорії випадків втрати працездатності вузлів і агрегатів, що найчастіше зустрічаються в мобільних машинах і призводять до основної частини витрат щодо забезпечення надійності техніки в експлуатації. Фізичні причини таких відмов – процеси зношування та накопичення втомних ушкоджень на рівні лабораторних досліджень і випробувань матеріалів, що вивчаються глибоко та всебічно, проте проблеми прискореного оцінювання та прогнозування механічної надійності елементів машин на стадіях проектування та початку серійного випуску не втрачають своєї актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді робіт [1, 2] наведено моделі різних деградаційних процесів і способи оцінювання показників надійності [3, 4], що використовують метод моментних функцій. Проте питання побудови та оцінювання параметрів комплексів моделей, що описують формування характеристик механічної надійності елементів машин, при цьому не розглядалися. Одна з об'єктивних причин цього – відсутність загальної методології, що дає змогу будувати комплекси моделей, що поєднують різні види інформації про об'єкт: результати стендових ресурсних випробувань, дані про надійність в умовах підконтрольної експлуатації та результати вимірювання механічної навантаженості елементів.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є побудова для подальшого практичного використання комплексів моделей механічної надійності, що створюють реальні передумови для переходу до

ресурсного проектування складальних одиниць і агрегатів мобільних машин.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

- побудувати інвертовану стохастичну модель надійності елементів машин, схильних до зношування;

- побудувати інвертовану стохастичну модель надійності елементів машин, що руйнуються внаслідок втомного руйнування;

- на основі отриманих результатів побудувати комплекси інвертованих стохастичних моделей, що забезпечують можливість спільного статистичного аналізу неоднорідної інформації про надійність у випадках типових для елементів машин видів руйнування: при зношуванні та втомі.

Основна частина дослідження. Нестационарні випадкові процеси, пов'язані зі зношуванням і накопиченням втомних пошкоджень, як правило, мають монотонний характер зміни всіх своїх реалізацій [5]. Тому надалі називатимемо такі процеси монотонними. Досить повний і зручний при вирішенні багатьох завдань механічної надійності спосіб опису нестационарного монотонного деградаційного процесу полягає в задаванні виду його функції або щільності розподілу $f_1(\Delta/t)$ у

перерізах часу (рис. 1, а) з параметрами, що є детермінованими монотонними функціями часу t або напрацювання в циклах навантаження N (рис. 1, б). Такі функції називатимемо параметричними. Характер їхньої зміни в часі має відповідати фізико-технічній сутності деградаційного процесу, а при виборі математичної структури параметричних функцій необхідно використовувати апробовані теоретичні

моделі відповідних видів механічної руйнації. На рисунку наведено схеми моделей двох основних видів деградаційних процесів в елементах машин: монотонно зростаючого $\Delta(t)$, пов'язаного зі зношуванням (рис. 1, а) і монотонно спадного $\sigma_{\Pi}(N)$, обумовленого втомним руйнуванням (рис. 1, б). При цьому процес $\Delta(t)$ утворений випадковими реалізаціями зміни параметра відмови Δ у часі, а процес $\sigma_{\Pi}(N)$

формується сукупністю випадкових індивідуальних кривих втоми, що залежать від циклічної довговічності N . Другою складовою комплексу моделей деградаційних відмов є розподіл випадкового граничного рівня параметра відмови Δ_{Π} , що характеризується щільністю $f_2(\Delta_{\Pi})$, або розподіл випадкової узагальненої характеристики змінної навантаженості елемента σ , що визначає його втомну довговічність, яка задається щільністю $f_2(\sigma)$.

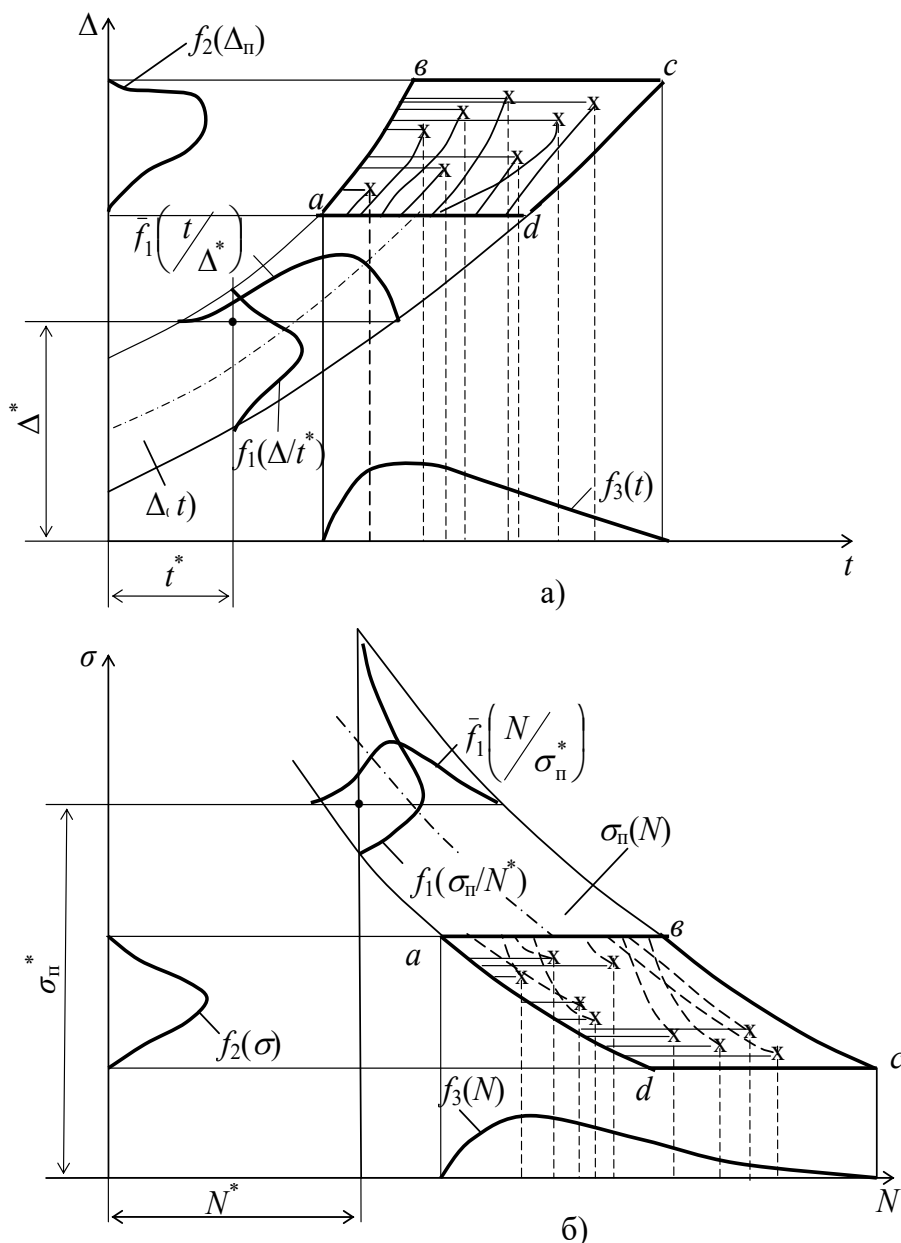


Рис. 1. Схеми комплексів моделей механічної надійності:
а – при зношуванні; б – втомному руйнуванні

Формування деградаційних відмов і розподілу ресурсу елементів машин зі зношування (рис. 1, а) і втомі (рис. 1, б) відповідно до наведеної схеми відбувається в результаті перетинів випадкових монотонних реалізацій деградаційних процесів $\Delta(t)$ і $\sigma_{\pi}(N)$ з фіксованими в часі випадковими рівнями величин Δ_{π} та σ .

Області *авсд*, показані на схемі, обмежують діапазон розсіювання деградаційних відмов, а ймовірнісні

характеристики ресурсу визначаються щільністю розподілу $f_3(t)$ при зношуванні та щільністю $f_3(N)$ при втомному руйнуванні. Ці щільності розподілів є третьою складовою кожного з розглянутих комплексів моделей механічної надійності.

Щодо монотонності аналізованих деградаційних процесів між щільностями розподілів у взаємно перпендикулярних перерізах, то справедливі [6, 7] співвідношення

$$\int_0^{\Delta} f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) \cdot d\Delta = 1 - \int_0^t \bar{f}_1\left(\frac{t}{\Delta}\right) \cdot dt, \quad (1)$$

$$\int_0^{\sigma_{\pi}} f_1\left(\frac{\sigma_{\pi}}{N}\right) \cdot d\sigma_{\pi} = \int_0^N \bar{f}_1\left(\frac{N}{\sigma_{\pi}}\right) \cdot dN.$$

Щільність розподілу ресурсу елемента при зношуванні при незалежності величин Δ і Δ_{π} може бути визначена [5] одним із виразів

$$f_3(t) = -\frac{d}{dt} \left\{ \int_0^{\infty} f_2(\Delta) \left[\int_0^{\Delta} f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) \cdot d\Delta \right] \cdot d\Delta \right\} =$$

$$= \frac{d}{dt} \left\{ \int_0^{\infty} f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) \left[\int_0^{\Delta} f_2(\Delta) \cdot d\Delta \right] \cdot d\Delta \right\}. \quad (2)$$

Аналогічно при втомному руйнуванні

$$f_3(N) = -\frac{d}{dN} \left\{ \int_0^{\infty} f_1\left(\frac{\sigma}{N}\right) \left[\int_0^{\sigma} f_2(\sigma) \cdot d\sigma \right] \cdot d\sigma \right\} =$$

$$= \frac{d}{dN} \left\{ \int_0^{\infty} f_2(\sigma) \left[\int_0^{\sigma} f_1\left(\frac{\sigma}{N}\right) \cdot d\sigma \right] \cdot d\sigma \right\}. \quad (3)$$

Співвідношення (2) та (3) однозначно пов'язують щільності $f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right)$, $f_2(\Delta_{\pi})$, $f_3(t)$ або $f_1\left(\frac{\sigma}{N}\right)$, $f_2(\sigma)$, $f_3(N)$, що входять до кожного з аналізованих комплексів моделей. Тому щільності розподілів, що входять до єдиного комплексу, обов'язково повинні мати загальні параметри.

Щільності вигляду $f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right)$ і $\bar{f}_1\left(\frac{t}{\Delta}\right)$ моделі деградаційних процесів містять параметричні функції, коефіцієнти яких при побудові моделей мають оцінюватися за статистичними даними про процес. Зазвичай такі дані мають дискретний характер, тобто задаються як координати вибіркового точок (t_i^*, Δ_i^*) . Статистичні дані

про ресурс елемента можуть містити випадкові напрацювання до граничного стану t_i і напрацювання працездатних об'єктів τ_i [8, 9]. За наявності вибірових даних про граничний рівень параметра відмови Δ_{pi} їх також слід використовувати при спільному оцінюванні параметрів і

коефіцієнтів параметричних функцій комплексу моделей. Найбільш ефективним способом спільного оцінювання параметрів розподілів і коефіцієнтів параметричних функцій є метод максимуму правдоподібності, що полягає в оцінюванні зазначених величин за умови [5]

$$L = \sum \ln f_1\left(\frac{\Delta_i^*}{t_i^*}\right) + \sum \ln \bar{f}_1\left(\frac{t_i^*}{\Delta_i^*}\right) + \sum \ln f_2(\Delta_{pi}) + \sum \ln f_3(t_i) + \sum \ln [1 - F_3(\tau_i)] \Rightarrow \max, \quad (4)$$

де $F_3(\tau_i)$ – функція розподілу ресурсу.

Зазвичай оцінювання параметрів з умови (4) потребує використання чисельних методів оптимізації. При розгляді комплексу моделей втомного руйнування (рис. 1, б) підхід до статистичного

оцінювання параметрів і коефіцієнтів буде аналогічним.

Конкретний вид розподілів, що описують моделі комплексів, можна вибирати з класу розподілів, що є узагальненням розподілу Л. Я. Пешеса [10]:

$$f\left(\frac{x}{t}\right) = \frac{\lambda^\alpha(t) \cdot e^{-\lambda(t)\varphi(x)}}{\Gamma(\alpha, \varphi(x_o))} [\varphi(x)]^{\alpha-1} \cdot \frac{d\varphi(x)}{dx}, \quad x_o < x < \infty, \quad (5)$$

де $\varphi(x)$ – позитивна монотонно зростаюча функція параметра відмови x ;

$x_o \geq 0$ – нижня межа можливих значень параметра;

$\Gamma(\alpha, \varphi(x_o)) = \int_{\varphi(x_o)}^{\infty} e^{-z} \cdot z^{\alpha-1} \cdot dz$ – неповна гамма-функція;

$\lambda(t)$ – параметрична функція, що визначає залежність деградаційного процесу від напрацювання.

Так, ураховуючи, що

$$f_1\left(\frac{\Delta}{t}\right) = \lambda(t) \cdot e^{-\lambda(t)\varphi(\Delta)} \cdot \frac{d\varphi(\Delta)}{d\Delta},$$

$$f_2(\Delta_{pi}) = \frac{\lambda_{pi}^\alpha \cdot e^{-\lambda_{pi}\varphi(\Delta_{pi})}}{\Gamma(\alpha, \varphi(\Delta_o))} [\varphi(\Delta_{pi})]^{\alpha-1} \cdot \frac{d\varphi(\Delta_{pi})}{d\Delta_{pi}},$$

за допомогою формули (2) отримаємо вираз для щільності розподілу ресурсу

$$f_3(t) = -\frac{\alpha \cdot \lambda_{pi}^\alpha}{[\lambda_{pi} + \lambda(t)]^{\alpha+1}} \cdot \frac{d\lambda(t)}{dt},$$

звідки випливає, що параметрична функція $\lambda(t)$ має бути монотонно спадною.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. Теоретичний аналіз основних деградаційних процесів, що визначають механічну надійність елементів машин, дав змогу розробити універсальний підхід до побудови комплексів стохастичних моделей надійності, що

забезпечує можливість спільного статистичного оцінювання параметрів моделей для процесів, зумовлених зношуванням і втомним руйнуванням. Практичне використання пропонованих комплексів моделей механічної надійності є доцільним як при прискореному оцінюванні, так і прогнозуванні надійності на стадії ресурсного проектування елементів мобільних машин.

Список використаних джерел

1. Woo S. Reliability Design of Mechanical Systems a Guide for Mechanical and Civil Engineers, 2nd ed. Springer Nature Singapore Pte Ltd. Singapore, 2020. 476 p.
2. Birolini A. Reliability Engineering. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.
3. Grynchenko O., Alforyov O. Mechanical Reliability. In Prediction and Management under Extreme Load Conditions. Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020. 125 p. doi.org/10.1007/978-3-030-41564-8.
4. Гринченко А., Алфєров А. Основы прогнозирования и управления надежностью в условиях экстремальных нагрузок. Харьков: ТОВ «Планета - Принт», 2017. 136 с.
5. Гринченко А. С. Механическая надежность мобильных машин: Оценка, моделирование, контроль. Харьков: Віровець А. П. «Апостроф», 2012. 259 с.
6. Гринченко А. С. Особенности построения инвертируемых стохастических моделей механической надежности при параметрических отказах. *Вісник ХДТУСГ*. Харків, 2004. Вип. 23. С. 140-145.
7. Гринченко О. С., Алфєров О. І., Юр'єва Г. П. Прогнозування та керування механічною надійністю за допомогою інверсійного методу. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. 2018. № 12. С. 210–213.
8. Alforyov O., Grynchenko O., Ponomarenko V., Shchur T., Tomporowski A., Kruszelnicka W., Walichnowska P. Agricultural Equipment Design Optimization Based on the Inversion Method. *Agriculture*. 2022. № 12. P. 1410. URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091410>.
9. Алфєров О., Савченко В., Свіргун О. Оцінювання показників надійності на основі результатів випробувань на стендах та в експлуатації. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Мелітополь: ТДАТУ, 2023. Вип. 13. т. 2. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-8.
10. Пешес Л. Я., Степанова М. Д. Основы теории ускоренных испытаний на надежность. Минск: Наука и техника, 1972. 168 с.

Алфєров Олексій Ігорович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри проектування технічних систем, Сумський національний аграрний університет. ORCID iD: 0000-0002-0357-3141. Тел.: +38 (099) 18-50-338. E-mail: alfogor@i.ua.

Alforyov Oleksiy, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Systems Design, Sumy National Agrarian University. ORCID iD: 0000-0002-0357-3141. Тел.: +38 (099) 18-50-338. E-mail: alfogor@i.ua.

Статтю прийнято 19.06.2023 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 697.1

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВАРІАНТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ ОФІСНОЇ БУДІВЛІ

Д-р техн. наук В. І. Дешко, асп. О. С. Наумчук

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE OPTIONS FOR THE MODERNIZATION OF THE HEAT SUPPLY AND THERMAL PROTECTION OF THE OFFICE BUILDING

Dr. Sc. (Tech.) V. Deshko, PhD student O. Naumchuk

Анотація. Концепція реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії направлені на досягнення цілей, викладених у Директиві Європейського Парламенту і Ради ЄС про енергетичну ефективність будівель, що говорить про вагомі кроки до підвищення енергоефективності будівельного сектору України. Згідно з вищевказаними нормативно-правовими документами, обов'язковою умовою нового будівництва та реконструкції існуючих будівель є забезпечення високого рівня теплового захисту будівлі та використання відновлювальних джерел для покриття необхідного енерговикористання. У роботі проведено техніко-економічне оцінювання модернізації офісної будівлі в місті Києві до рівня високоенергоефективної, що використовує тепловий насос для забезпечення необхідного теплозабезпечення. Оцінювання генерації необхідного теплозабезпечення будівлі тепловим насосом і використаної електричної енергії тепловим насосом базується на результатах моделювання у програмному середовищі GeoTSOL.

З метою оцінювання економічної привабливості проєкту модернізації існуючої будівлі до рівня високоенергоефективної, що використовує відновлювальні джерела для теплозабезпечення, проведено розрахунок потреби енергії на опалення у програмному середовищі Design Builder та інтегральних витрат на опалення будівлі при використанні відновлювальних і традиційних джерел енергії при різних рівнях теплового захисту. Отримані результати свідчать про привабливі як з економічної, так і екологічної точки зору можливості реалізації будівництва високоенергоефективної будівлі, що використовує для теплозабезпечення відновлювальні джерела енергії.

Ключові слова: високоенергоефективна будівля, джерело енергії, тепловий насос, nZEB, теплозабезпечення, енергозабезпечення, потреба енергії на опалення.

Abstract. The concept of implementation of the state policy in the field of ensuring the energy efficiency of buildings in terms of increasing the number of buildings with close to zero energy consumption and the National Plan for the increase in the number of buildings with close to zero energy consumption are aimed at achieving the goals set out in the Energy Performance of Building Directive, which indicates significant steps towards improving the energy efficiency of the Ukrainian construction sector. According to the above regulations, a prerequisite for new construction and renovation of existing buildings is to ensure a high level of thermal insulation of the building and the

use of renewable sources to cover energy consumption. The work carried out a feasibility study of the modernization of an office building in the city of Kyiv to the level of a highly energy-efficient building using a heat pump to provide the necessary heat supply. Estimation of generation of required heat supply of the building by the heat pump and used electrical energy by the heat pump is based on the simulation results in the GeoTSOL software environment.

In order to assess the economic attractiveness of the project for upgrading an existing building to the level of a highly energy-efficient building using renewable sources for heat supply, the calculation of the energy demand for heating in the Design Builder software environment and the integral costs for heating the building using renewable and traditional energy sources at different levels of thermal protection was made. The results obtained indicate attractive, both from an economic and environmental point of view, the possibilities of implementing the construction of a highly energy-efficient building that uses renewable energy sources for heat supply.

Keywords: high-energy efficient building, energy source, heat pump, nZEB, heat supply, energy supply, heating energy consumption.

Вступ. Енергоємність валового внутрішнього продукту є однією з фундаментальних характеристик економіки країни та характеризується рівнем витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленого валового внутрішнього продукту [1]. Історично країни, що є експортерами сировини, мають вищий показник енергоємності, тому у світовому рейтингу країн з найбільшою енергоємністю ВВП країни колишнього Радянського Союзу займають лідируючі позиції. Незважаючи на тенденцію зниження енергоємності валового внутрішнього продукту протягом років в Україні, український показник перевищує світові значення приблизно вдвічі [2, 3], що пояснюється різницею в економічній структурі та досягненнях у сфері енергоефективності [4]. Енергоефективність як напрям забезпечення посилення енергетичної безпеки та декарбонізації країни і світу в цілому, забезпечує економію енергії в різних сферах економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними роботи [4], частка загального глобального кінцевого споживання енергії будівлями та будівельним сектором загалом складає 30 %. Разом з тим прямі та непрямі викиди від експлуатації будівель у 2021 році зросли на 5 %, порівняно з 2020 роком і на 2 %, порівняно з 2019 роком [5]. Відсоткова

частка глобальних енергетичних і технологічних викидів у 2021 році [5] є такою:

- 5,7 % – прямі викиди від експлуатації житлових будівель;
- 10,9 % – непрямі викиди від експлуатації житлових будівель;
- 2,7 % – прямі викиди від експлуатації нежитлових будівель;
- 7,6 % – непрямі викиди від експлуатації нежитлових будівель;
- 6,4 % – викиди від будівництва будівель;
- 6,6 % – викиди інших напрямків будівельної галузі;
- 30 % – викиди інших галузей промисловості;
- 21,8 % – викиди транспорту;
- 8,3 % – інші викиди.

Тобто 26,9 % загальних світових викидів пов'язані з експлуатацією будівель (використання викопного палива як основного теплоносія, несвідоме використання палива, недостатня обізнаність у питаннях енергозбереження та енергоефективності), 13 % глобальних викидів забезпечуються будівельним сектором ще на етапі будівництва. Загалом 39,9 % світових викидів у 2021 році покривала будівельна галузь. Виконання Глобальних цілей сталого розвитку [6] у частині декарбонізації секторів економіки

Європи, у тому числі будівельної галузі, відбувається відповідно до нормативно-правових документів, опублікованих Європейською Комісією: Директиви про енергетичну ефективність будівель [7], Директиви про енергоефективність [8], Європейської Зеленої угоди [9]. Виконання основних цілей [7-9] дасть змогу забезпечити екологічно чисте середовище для зростання майбутніх поколінь, більш чисту енергію та використання чистих технологічних інновацій різних галузей економіки, будівництво високоенергоефективних будівель і глобально конкурентоспроможну і стійку економіку.

Конкретні завдання в частині будівництва високоенергоефективних будівель викладені в Директиві [7] та означають забезпечення майже нульового споживання енергії в усіх нових житлових будівлях до кінця 2020 року та для всіх нових громадських будівель після 31 грудня 2018 року. Так, забезпечення майже нульового споживання енергії будівлями встановлюється вимогами до огорожувальних конструкцій і використаних джерел енергії (переважно необхідне споживання енергії з відновлювальних джерел).

Ратифікація Угоди про асоціацію між Україною, з одного боку, і Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами, з іншого боку [10], у 2014 році означає виконання вимог Директиви [7], у тому числі у встановленні вимог до будівель з майже нульовим споживанням енергії (стаття 338, додаток XXVII [7]). Проєкт наказу Мінрегіону «Про затвердження Вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» [11], Концепція реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [12] і Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання

енергії [13], як основні нормативно-правові документи України в питанні підвищення енергоефективності будівельного сектору, містять зобов'язання знизити загальний показник постачання первинної енергії та викидів парникових газів в атмосферу, що призведе до збільшення частки високоенергоефективних будівель. Послідовна реалізація цих зобов'язань потребує техніко-економічних обґрунтувань відповідно до національних умов і особливостей експлуатації будівель різного призначення.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є техніко-економічне оцінювання модернізації офісної будівлі до рівня nZEB. Для виконання мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати можливості покриття необхідного теплозабезпечення існуючої будівлі, а також будівлі, утепленої відповідно до вимог України та Швеції відновлювальним джерелом енергії.

2. Оцінити генерацію теплової енергії відновлювальним джерелом для різних рівнів теплового захисту будівлі з використанням динамічного моделювання.

3. Оцінити інтегральні витрати на опалення при різних рівнях теплового захисту будівлі при використанні різних джерел енергії – від традиційного джерела енергії, що працює на викопному паливі, до відновлювального джерела енергії.

Основна частина дослідження. За результатами дослідження, опублікованими Київською школою економіки наприкінці жовтня 2022 року [14], загальна сума задокументованих збитків житловій і нежитловій нерухомості, іншій інфраструктурі в результаті російсько-української війни склала понад 127 млрд дол. США (станом на вересень 2022 року). Загальна площа зруйнованих або пошкоджених об'єктів житлового сектору становить 74,1 млн кв. м. Разом з тим з початку війни пошкодження, повного зруйнування або «привласнення» російськими представниками зазнали щонайменше 616 адміні-

стративних будівель в Україні. Майбутнє відновлення пошкоджених будівель відбуватиметься відповідно до робіт [11-13] і вимог [15]. Це означає, що тепловий захист нових/реконструйованих будівель відповідає нормам чинного законодавства, а енергія, що використовується будівлею, – переважно з відновлювальних джерел (сонячна, вітру, геотермальна, гідроенергетика, океану, біомаси [16]). Слід зазначити, що будівництво за вимогами, описаними вище, знайшло своє практичне застосування у країнах Східної Європи. Наприклад, з метою підвищення лояльності громадськості та масштабування будівель з майже нульовим споживанням енергії в

Румунії подано пілотний проєкт модернізації середньої школи енергетичних технологій [17] до рівня nZEB. Загальний термін окупності проєкту [17] становить три з половиною роки, що у свою чергу створює перспективи розвитку будівель рівня nZEB.

Як приклад модернізації старих будівель до таких, що є енергонезалежними та забезпечують необхідну потребу в енергії відновлювальними джерелами, розглянемо для офісної будівлі в місті Києві [18]. Початковим етапом дослідження є створення моделі існуючої будівлі в середовищі DesignBuilder (рис. 1) з техніко-фізичними параметрами, поданими в табл. 1.

Таблиця 1

Техніко-фізичні параметри офісної будівлі в м. Києві

Тип огорожувальної конструкції		Термічний опір огорожувальної конструкції R, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
Зовнішні стіни		1,36
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами		0,37
Світлопрозорі конструкції	металопластикові	0,6
	склоблоки	0,4
Двері зовнішні	металопластикові	0,6
	металеві	0,3
Дах		0,4

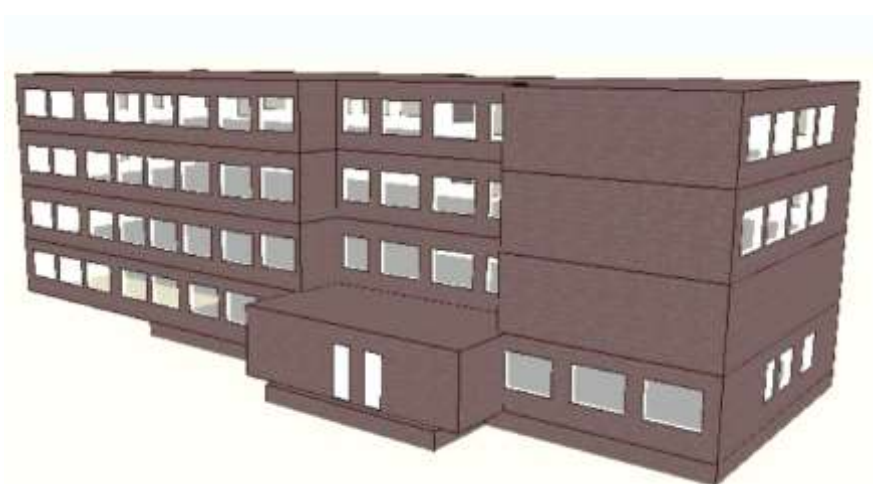


Рис. 1. Модель офісної будівлі в м. Києві

Покращення теплового захисту будівлі проводилось поетапно відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] (як забезпечення «високоенергоєфективного» теплового захисту) з використанням теплоізолюючих матеріалів, описаних у роботі [18]. Так, розрахунок необхідного енергоспоживання в середовищі DesignBuilder проведено для трьох варіантів [18]:

1) існуюча ситуація – неутеплена будівля, значення термічних опорів огорожувальних конструкцій відповідають значенням табл. 1;

2) тепла оболонка будівлі покращена відповідно до вимог України [19];

3) тепла оболонка будівлі покращена відповідно до вимог Швеції [20].

З метою виконання вимог [7, 9, 11] і виходячи з оцінювання географічних особливостей розміщення об'єкта дослідження в розрізі можливостей використання відновлювальних джерел енергії безпосередньо на об'єкті або поблизу [11] розглянуто варіант використання теплового насоса типу «повітря – вода» як основного джерела енергії для опалення будівлі. Тобто розглядається варіант використання теплового насоса для опалення громадської будівлі в місті Києві для трьох рівнів теплового захисту будівлі – неутеплена будівля, будівля, утеплена відповідно до вимог України [19], і будівля, утеплена відповідно до вимог Швеції [20]. Аналіз можливостей генерації енергії тепловим насосом для трьох вищеописаних варіантів виконувався в середовищі GeoTSOL [21]. Цей програмний продукт дає змогу оцінити енергозабезпечення об'єкта з використанням теплового насоса для теплозабезпечення будівлі з урахуванням таких параметрів:

- кліматичні дані (зовнішня температура повітря залежно від регіону розміщення будівлі);

- дані енергоспоживання будівлі на опалення;

- опалювальна площа будівлі;
- внутрішня температура;
- верхня межа зовнішньої температури, при якій працюватиме система опалення;

- проєктна зовнішня температура [22] (програма обмежується значеннями температури не нижче $-19,9^{\circ}\text{C}$).

Разом з тим програма дає змогу здійснювати моделювання енергозабезпечення будівлі для різних режимів роботи: моновалентного, моноенергетичного та бівалентного. За роботою [21], моновалентний режим роботи характеризується використанням теплового насоса як єдиного джерела теплозабезпечення будівлі, моноенергетичний режим передбачає паралельну, альтернативну або частково паралельну роботу теплового насоса та додаткового нагрівача, бівалентний режим означає використання теплового насоса та котла при їхній паралельній, альтернативній і частково паралельній роботі.

Слід зазначити, що в роботі не розглядається можливість заміни інженерних систем тепlopостачання та постачання гарячої води для потреб відвідувачів будівлі. Тобто вибір теплового насоса та режиму роботи теплового насоса виконується відповідно до гідравлічного режиму існуючої системи опалення та необхідного енергозабезпечення, отриманого в результаті динамічного моделювання будівлі в DesignBuilder для трьох варіантів теплового захисту будівлі. Врахованим є факт більш високої ефективності застосування теплового насоса для утепленої будівлі [23], тому теплозабезпечення неутепленої будівлі тепловим насосом у GeoTSOL розглядаємо лише для бівалентного режиму роботи. У програмі GeoTSOL обираємо систему «bivalent HPS with space heating and DHW», дані щодо споживання гарячої води приймаємо рівними нулю. Схема підключення котла і теплового насоса зображена на рис. 2.

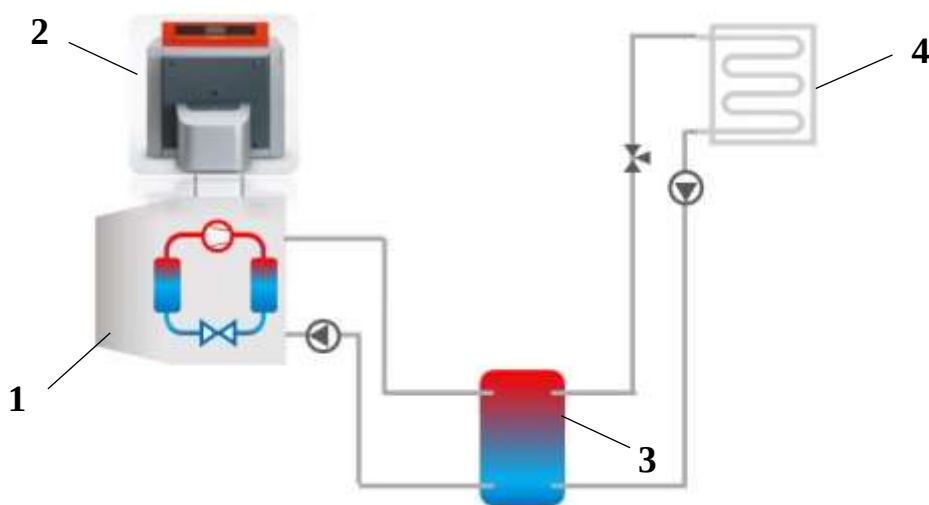


Рис. 2. Бівалентний режим роботи теплового насоса. Схема підключення котла і теплового насоса: 1 – тепловий насос типу «повітря – вода»; 2 – газовий котел; 3 – бак-накопичувач; 4 – радіатор системи опалення

Таблиця 2

Технічні параметри обладнання, що працюють у бівалентному режимі, для забезпечення необхідного тепlopостачання неутепленої будівлі

Тип обладнання	Компанія-виробник	Модель	Рном., кВт	ККД котла, %	COP теплового насоса	Об'єм бака-накопичувача, л
Тепловий насос типу «повітря – вода»	Waterkotte GmbH	EcoTouch Air Kaskade 5120.5	107,2	-	5,0	-
Котел, що працює на природному газі	Viessmann Werke GmbH & Co KG	Vitoradial 300-T	407,0	97	-	-
Бак-накопичувач (буферна ємність)	Viessmann Werke GmbH & Co KG	Vitocell 100-W	-	-	-	120

Щотижневі дані використання енергії протягом опалювального періоду при поетапному покращенні теплової оболонки будівлі від неутепленої до утепленої згідно з вимогами України [19] і Швеції [20] (дані

динамічного моделювання в DesignBuilder) і генерації теплової енергії неутепленої будівлі тепловим насосом (динамічне моделювання у GeoTSOL) подано на рис. 3.

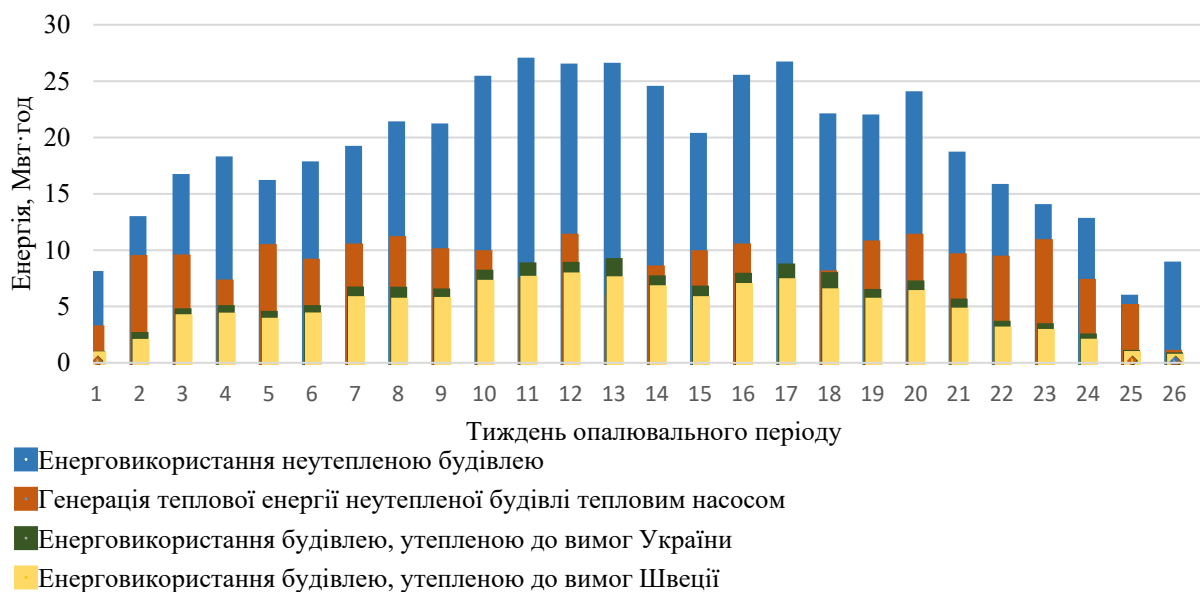


Рис. 3. Енерговикористання будівлею, що розглядається, за відсутності утеплення, при утепленні відповідно до вимог України і Швеції, а також генерація теплової енергії неутепленої будівлі тепловим насосом

Як видно з рис. 3, тепловий насос обраної потужності (табл. 2) генерує ліву частку необхідного енергозабезпечення неутепленої будівлі (43,36 %). Разом з тим графік ілюструє можливість використання теплового насоса як основного джерела енергії для утепленої відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] будівлі. Для перевірки такого припущення динамічне моделювання енергозабезпечення утеплених будівель (за нормами України і Швеції) тепловим насосом у GeoTSOL розглянемо для моноенергетичного режиму. Умови моделювання для утепленої відповідно до

вимог України [19] і Швеції [20] будівлі щодо використання гарячої води незмінні (споживання гарячої води відвідувачами офісної будівлі забезпечене від інших джерел), місячна теплова потужність відповідає значенням необхідного енергозабезпечення для утепленої до вимог України і Швеції будівлі (отримано як результат моделювання утеплених будівель у DesignBuilder). Схема підключення теплового насоса при моноенергетичному режимі (моноенергетичний частково паралельний режим з використанням додаткового нагрівача) зображена на рис. 4.

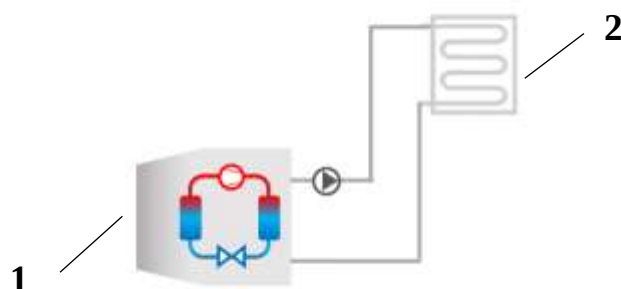


Рис. 4. Моноенергетичний режим роботи теплового насоса:
1 – тепловий насос типу «повітря – вода»; 2 – радіатор системи опалення

Щотижневі дані генерації теплової енергії тепловим насосом протягом опалювального періоду при покращенні

теплової оболонки будівлі відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] подані на рис. 5.

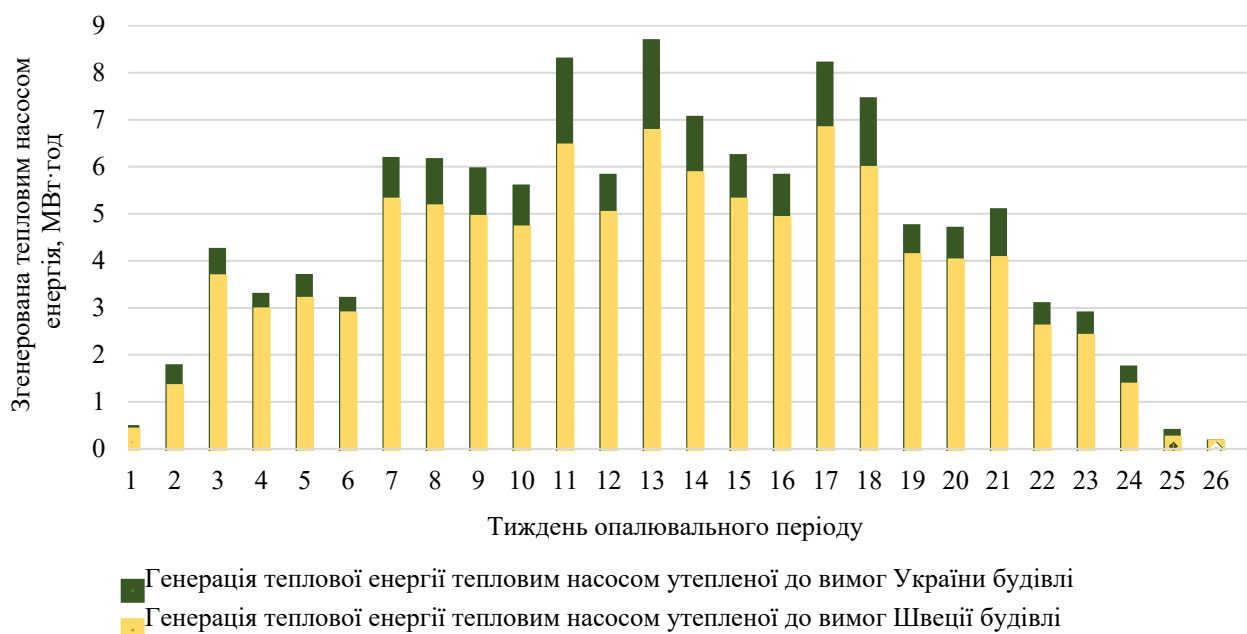


Рис. 5. Генерація теплової енергії тепловим насосом протягом опалювального періоду при покращенні теплової оболонки будівлі відповідно до вимог України і Швеції

Для забезпечення необхідного енерговикористання будівлею, утепленою відповідно до вимог України [19], тепловим насосом, що працює за умов моноенергетичного частково паралельного режиму з нагрівальним елементом, обрано тепловий насос компанії WATERKOTTE GmbH (модель EcoTouch Air Kaskade 5120.5 потужністю 107,2 кВт) і нагрівальний елемент потужністю 20 кВт. Генерація теплової енергії тепловим насосом і нагрівальним елементом при моноенергетичному режимі роботи в цьому випадку складає 117,31 МВт·год, причому нагрівальний елемент покриває сумарну генерацію теплової енергії на 10,6 %.

Необхідне енергозабезпечення будівлі, утепленої відповідно до вимог Швеції [20], покривається тепловим насосом моделі EcoTouch Air Kaskade 5120.5 (Waterkotte GmbH) потужністю 107,2 кВт і нагрівальним елементом потужністю 5 кВт. Разом з тим генерація теплової енергії тепловим насосом і нагрівальним елементом при моноенергетичному режимі роботи становить 97,3 МВт·год, нагрівальний елемент покриває сумарну генерацію теплової енергії на 1,3 %.

Динаміка споживання електроенергії, необхідної для забезпечення роботи системи з тепловим насосом для двох вищевказаних варіантів утеплення будівлі, зображена на рис. 6.

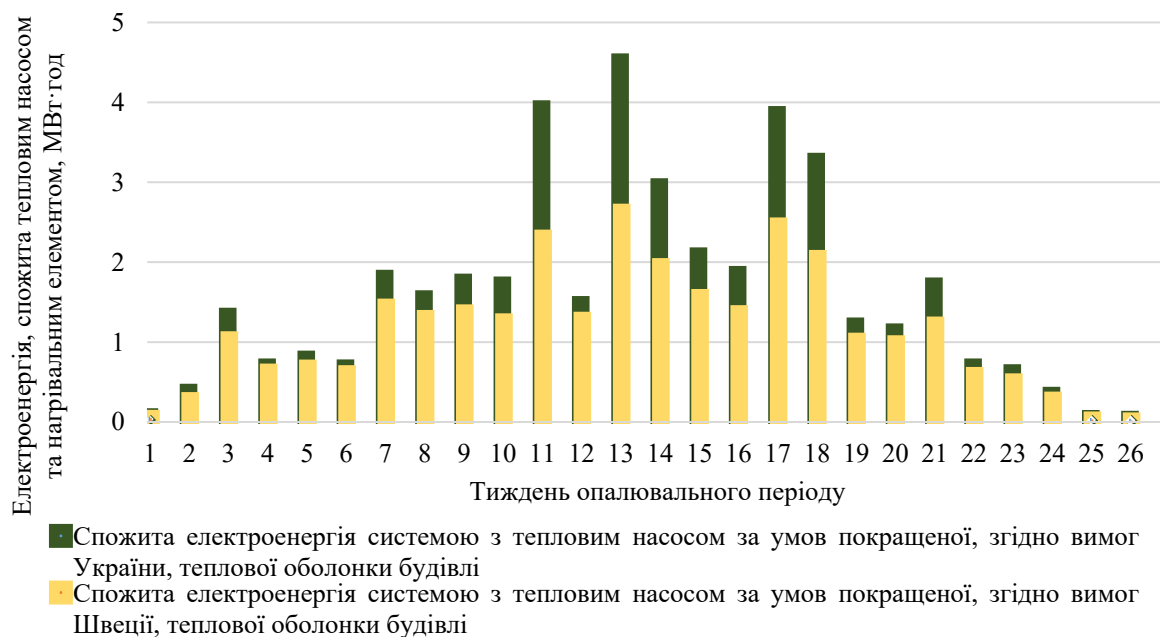


Рис. 6. Динаміка споживання електроенергії моноенергетичною системою теплового насоса і нагрівального елемента при покращеній відповідно до вимог України та Швеції теплової оболонці будівлі

Для оцінювання економічної привабливості модернізації громадської будівлі до рівня nZEB за роботою [11] проведено розрахунки інтегральної вартості витрат на опалення при покращенні теплової оболонки будівлі відповідно до

вимог [19, 20] і заміні джерела енергії з такого, що працює на природному газі, на таке, що є відновлювальним (тепловий насос типу «повітря – вода»). Розрахунок інтегральної вартості проводимо [23] за формулою

$$B = \sum_{t=0}^n \frac{B_t^{\text{експл}}}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^n B_t^{\text{енерг}} \cdot \frac{(1+l \cdot t)}{(1+E)^t} + I_0 + I_{iz} + I_{co},$$

де $B_t^{\text{енерг}}$ – річні витрати за спожиті енергоносії, грн;

$B_t^{\text{експл}}$ – інші витрати, грн;

I_0 – капітальні витрати на придбання теплогенерувального обладнання, грн;

I_{iz} – витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі, грн;

I_{co} – витрати на придбання приладів опалення, грн;

l – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії;

n – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, р.;

E – ставка дисконтування.

Відповідно до наведеної формули проведено розрахунок основних статей витрат, що включають розрахунок вкладень для утеплення [18], придбання теплогене-

рувального обладнання, щорічних експлуатаційних витрат для забезпечення сталої та ефективної роботи систем, що розглядаються, і монтажних і пускорегулю-

вальних робіт (10 % вартості придбання теплогенерувального обладнання). У роботі, як згадано вище, заміну системи опалення не розглядаємо, у першому наближенні ставкою дисконтування та коефіцієнтом

приросту вартості на енергоносії нехтуємо. Для якісного оцінювання інтегральних витрат на опалення враховуємо витрати палива для кожного з варіантів порівняння і тарифи на енергоносії (табл. 3).

Таблиця 3

Капітальні витрати при модернізації будівлі

Заходи енергоефективності	Витрати палива, тис. м ³ /р., [кВт·год/р.]	Вен*, млн грн	Із, млн грн [18]	Іо, млн грн/джерело даних	В експл., млн грн
1	2	3	4	5	6
Існуюча неутеплена будівля	47,12	2,4	-	-	0,04
Неутеплена будівля, джерело енергії – тепловий насос і котел, що працює на природному газі (бівалентний режим роботи)	25,84, [72, 126]	1,41	-	2,67 / [24-26]	0,27
Будівля, утеплена відповідно до вимог України, джерело енергії – котел, що працює на природному газі	12,71	0,55	3,33	0,49 / [27]	0,05
Будівля, утеплена відповідно до вимог України, джерело енергії – тепловий насос і нагрівальний елемент (моноенергетичний режим роботи)	[41 153]	0,16	3,33	1,89 / [26, 28]	0,18
Будівля, утеплена відповідно до вимог Швеції, джерело енергії – котел, що працює на природному газі	8,04	0,35	5,07	0,22 / [29]	0,02
Будівля, утеплена відповідно до вимог Швеції, джерело енергії – тепловий насос і нагрівальний елемент (моноенергетичний режим роботи)	[28 514]	0,11	5,07	1,85 / [26, 28]	0,18

Примітка. *Розраховано з урахуванням середньорічного тарифу 2022 року на природний газ [30] та електричну енергію (тариф за комерційною пропозицією вартості електроенергії) для юридичних осіб.

Зміну інтегральної вартості витрат на опалення будівлі при різних показниках утеплення та використаного джерела енергії

(табл. 3, стовпець 1) розглянемо для 40 років (рис. 7).

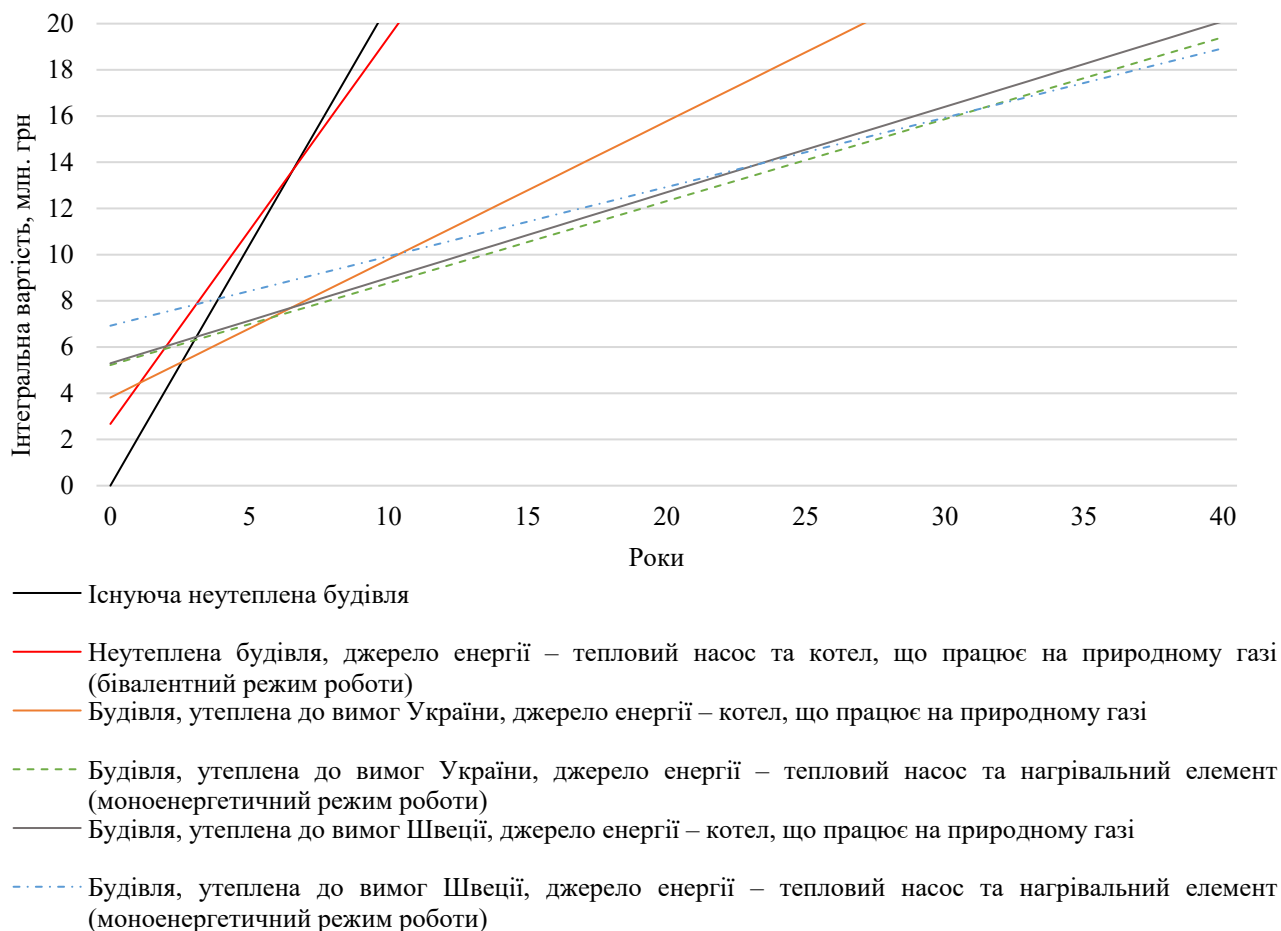


Рис. 7. Зміна інтегральних витрат на опалення будівлі при різних показниках утеплення та використаному джерелі енергії

З урахуванням витрат на енергоносії, вартості утеплення огорожувальних конструкцій будівлі та придбання теплогенерувального обладнання та динаміки інтегральних витрат на опалення будівлі (рис. 6) можемо зробити висновок про економічну привабливість модернізації системи енергозабезпечення неутепленої будівлі. Так, термін окупності заміни котла на природному газі на тепловий насос і газовий котел (бівалентний частково паралельний режим роботи) для неутепленої будівлі (фізико-технічні характеристики огорожувальних конструкцій відповідають даним табл. 1) становить близько семи років. З точки зору економічної доцільності, такий крок зменшення витрат викопного палива

розцінюється як прийнятний і привабливий, проте розглядати таку заміну джерела енергії будівлі в розрізі nZEB недоцільно – будівля не є високоенергоефективною, а частка використаної з відновлювальних джерел енергії становить менше 50 % [11]. Разом з тим рис. 6 демонструє термін окупності системи теплозабезпечення утепленої відповідно до вимог України будівлі [19] з тепловим насосом (що працює в моноенергетичному частково паралельному режимі з нагрівальним елементом) при встановленні такої системи замість котла, що працює на природному газі. Так, за умови відповідності теплової оболонки будівлі вимогам законодавства [19] тепловий насос уже на шостий рік експлуатації виглядає більш привабливим

варіантом порівняно з котлом на природному газі. Дещо інша ситуація для випадку заміни джерела теплоти з котла на тепловий насос при покращеній відповідно до вимог Швеції [20] тепловій оболонці будівлі. Як видно з рис. 6, термін окупності системи теплозабезпечення з тепловим насосом за умов утепленої відповідно до вимог Швеції будівлі [20] становить 23 роки. За роботою [31], життєвий цикл теплового насоса становить від 15 до 20 років. Це означає, що заміна котла на природному газі тепловим насосом при високому тепловому захисті будівлі (за вимогами Швеції) є мінімально доцільною при існуючих тарифах на енергоносії, вартості обладнання та експлуатації.

Загалом проєкт модернізації існуючої неутепленої будівлі, що використовує природний газ для теплозабезпечення, до рівня високоенергоефективної будівлі, теплозабезпечення якої покривається за рахунок відновлювального джерела енергії (тепловий насос «повітря – вода») є досить привабливим при розглянутих тарифах на енергоносії. Так, при покращенні теплової оболонки будівлі відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] і використанні теплового насоса для забезпечення необхідного енерговикористання споживання енергії будівлею можна вважати таким, що близьке до нуля. Власне, термін окупності реалізації вищеприписаної модернізації становить чотири та три роки відповідно для утеплення згідно з нормами України та Швеції.

Висновки. Розглянуто можливості теплозабезпечення відновлювальним джерелом енергії (тепловим насосом) з використанням динамічного моделювання в середовищі GeoTSOL для трьох варіантів утеплення офісної будівлі в місті Києві: неутеплена будівля, будівля, утеплення якої виконано за вимогами України [19], будівля, утеплення якої виконано за вимогами Швеції [20]. Енерговикористання будівлі для кожного з описаних варіантів є результатом динамічного моделювання у

програмі DesignBuilder та одним з ключових параметрів, що впливає на вибір системи з тепловим насосом. Так, урахувавши європейський досвід і напрацювання щодо nZEB, оцінено ефективність модернізації теплозабезпечення для різних режимів роботи системи з тепловим насосом при різних рівнях теплового захисту будівлі:

1) неутеплена будівля – бівалентний частково паралельний режим роботи теплового насоса типу «повітря – вода» і котла, що працює на природному газі. Термін окупності заміни існуючого котла на природному газі становить сім років;

2) утеплена за вимогами України [19] будівля – моноенергетичний частково паралельний режим роботи теплового насоса з додатковим нагрівачем. Термін окупності модернізації неутепленої будівлі з котлом на природному газі до енергоефективної будівлі з тепловим насосом – чотири роки, маємо також суттєвий екологічний ефект. Термін окупності заміни джерела енергії з котла на природному газі на тепловий насос для вже покращеної відповідно до вимог України теплової оболонки будівлі – 5,8 року;

3) утеплена відповідно до вимог Швеції [20] будівля – моноенергетичний частково паралельний режим роботи теплового насоса з додатковим нагрівачем. Термін окупності модернізації неутепленої будівлі з котлом на природному газі до високоенергоефективної будівлі з тепловим насосом – три роки, маємо також суттєвий екологічний ефект. Термін окупності заміни джерела енергії з котла на природному газі на тепловий насос уже покращеної відповідно до вимог Швеції теплової оболонки будівлі – 23 роки.

Отримані результати свідчать про привабливі можливості модернізації неенергоефективної будівлі до рівня nZEB як з економічної, так і екологічної точки зору. Використання відновлювальних джерел енергії для забезпечення необхідного енергоспоживання при існуючій динаміці тарифів на енергоносії є

більш ніж реальним для юридичних та побутових споживачів. У подальших дослідженнях слід урахувати діючу в Україні ставку дисконтування та приріст цін на енергоносії з метою більш детального оцінювання інтегральних витрат на опалення при модернізації будівлі до рівня

такої, споживання енергії якою близьке до нуля, провести екологічне оцінювання розглянутих варіантів модернізації та проаналізувати шляхи забезпечення необхідного охолодження будівлі відновлювальними джерелами.

Список використаних джерел

1. Енергоємність ВВП – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Енергоємність_ВВП#Світ.
2. World Development Indicators-Google Public Data Explorer. *Wayback Machine*. URL: https://web.archive.org/web/20160304205851/http://www.google.com.ua/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9_&met_y=ny_gdp_mkt_p_cd&tdim=true&dl=en&hl=en&q=world+gdp.
3. GDP; PPP (US dollar) in Ukraine. *Wayback Machine*. URL: <https://web.archive.org/web/20111018052033/http://tradingeconomics.com/ukraine/gdp-ppp-us-dollar-wb-data.html>.
4. Energy intensity of GDP | Global Energy Intensity Data | Enerdata. *World Energy Statistics | Enerdata*. URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html>.
5. Buildings – Topics - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/topics/buildings>.
6. Цілі сталого розвитку | United Nations Development Programme. *UNDP*. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku/affordable-and-clean-energy>.
7. Energy performance of buildings directive. [Online]. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. [Accessed: 2018].
8. Directive 2012/27/EU. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance. Official edition. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0027-20210101>.
9. A European Green Deal. *European Commission*. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
10. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Угода між Україн. та Європ. Союзом про асоц. від 21.03.2014 р. № 984_011. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011/ed20140321#Text
11. Про затвердження Вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії: проект наказу Міністерства від 30.12.2020 р. URL: <https://www.minregion.gov.ua/base-law/grom-convers/elektronni-konsultatsiyi-z-gromadskisty/proekt-nakazu-minregionu-pro-zatverdzhennya-vymog-do-budivel-z-blyzkym-do-nulovogo-rivnem-spozhyvannya-energiyi/>
12. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та затвердження Національного плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.01.2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-p#n11>.

13. Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.01.2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-p#n172>.
14. Загальна сума збитків, завдана інфраструктурі України, складає понад \$127 млрд – звіт KSE Institute станом на вересень 2022 року. *Kyiv School of Economics*. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-skladaye-ponad-127-mlrd-zvit-kse-institute-stanom-na-veresen-2022-roku/>.
15. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6-31:2016 ; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ, 2022.
16. What is renewable energy? *United Nations. Climate Action*. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy#:~:text=Renewable%20energy%20is%20energy%20derived,plentiful%20and%20all%20around%20us>.
17. Premiere in Romania: 'Elie Radu' Energy Technology High School Rehabilitated at NZEB Standard. *Energy Industry Review*. URL: <https://energyindustryreview.com/energy-efficiency/premiere-in-romania-elie-radu-energy-technology-high-school-rehabilitated-at-nzeb-standard/>.
18. Економічна оцінка підвищення теплового захисту громадських будівель до сучасних європейських вимог / В. Дешко та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2022. № 2. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261277>.
19. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo – komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2017. *DBN V.2.6-31:2016. Teplova izolyatsiya budivel'*. Kyiv.
20. Boverket. 2022. *Boverket's building regulations – mandatory provisions and general recommendations, BBR*. [online] URL: <https://www.boverket.se/en/start/publications/publications/2019/boverkets-building-regulations--mandatory-provisions-and-general-recommendations-bbr/>.
21. GeoT*SOL | Calculation and simulation software for heat pump systems. *Valentin Software | Planungs- und Simulationssoftware für erneuerbare Energien*. URL: <https://valentin-software.com/en/products/geotsol/>.
22. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 ; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ, 2011. 127 с. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929.
23. Буяк Н. Оцінювання ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01. Київ, 2017. 214 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21401/1/diss_Buiak.pdf.
24. Конденсаційний котел Vaillant ecocraft exclusiv. *Modernsys. Сучасні інженерні системи*. URL: <https://modernsys.com.ua/uk/kondensatsionnyj-napolnyj-kotel-vaillant-ecocraft-exclusiv-vkk2806-3-e-ru.html>.
25. WINDHAGER ACK4000. *Original Hersteller Preislisten und Rabatte*. URL: <http://www.heizungs-discount.de/rabatt-portal/preisvergleich-windhager/windhager/windhager-speicher-und-behaelter/windhager-ack4000-psm4000-waermespeiche-ack4000.html>.
26. ООО Смарт Климат Груп. *Smart Climate*. URL: https://smartclimate.com.ua/prod28766-geotermalnii_teplovoi_nasos_ecotouch_ds_50905dt.html.
27. Газовый котел Viessmann Vitorond 200 125 кВт с Vitotronic 200. *Строительный магазин супермаркет Инстал Украина*. URL: <https://in-ua.com/products/viessmann-vitorond-200-125-kvt-s-vitotronic-200-s-gazovoj-gorelkoj-otdelnyj-segment>.
28. Нагрівальний тен для бойлера. *Modernsys. Сучасні інженерні системи*. URL: <https://modernsys.com.ua/uk/nagrevatelnyy-ten-dlya-boylera-drazice-tpk-210-12-3-6kw-10352-ru.html>.

29. Газовый котел Viessmann Vitorond 100 100 кВт. *Строительный магазин супермаркет Инстал Украина*. URL: <https://in-ua.com/products/viessmann-vitorond-100-100-kvt-s-vitotronic-200-s-gorelkoj-otdelnyj-segment>.

30. Тарифні плани. *Нафтогаз України. Газопостачальна компанія*. URL: <https://gas.ua/uk/business/tariffs>.

31. ДСТУ EN 15459-1:2017. Енергоефективність будівель. Процедура економічного оцінювання енергетичних систем будівлі. Частина 1. Процедури розрахунку. На заміну ДСТУ Б EN 15459:2014; чинний від 2018-07-01. Вид. офіц. 2017. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=76040.

Дешко Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри теплової та альтернативної енергетики, Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Інститут технічної теплофізики НАН України, ORCID iD: 0000-0002-8218-3933. Тел.: 044- 204- 82-50. E-mail: te@kpi.ua.

Наумчук Олена Сергіївна, аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики, Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ORCID iD: 0000-0002-7059-8867. Тел.: +38 (068) 959-96-84. E-mail: lenanaumchuk13@gmail.com.

Deshko Valerii, Dr. of Tech. Sc., prof. of Department of Thermal and Alternative Energy of the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Energy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID iD: 0000-0002-8218-3933. Tel. : 044-204-82-50. E-mail: te@kpi.ua.

Naumchuk Olena, Ph. D. student of Department of Thermal and Alternative Energy of the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Energy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID iD: 0000-0002-7059-8867. Tel.: +38 (068) 959-96-84. E-mail: lenanaumchuk13@gmail.com.

Статтю прийнято 16.05.2023 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 691.327.014.13

ВПЛИВ ВЛАСНИХ НАПРУЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ПРИ СТИСКУ В ЧАСІ

Кандидати техн. наук О. Г. Фенко, П. Б. Митрофанов, О. А. Крупченко, П. А. Юрко,
студент Д. О. Фенко

**THE IMPACT OF ITS OWN STRESSES ON CONCRETE STRENGTH
BY COMPRESSION UNDER THE INFLUENCE OF TIME**

PhD (Tech.) O. Fenko, PhD (Tech.) P. Mytrofanov, PhD (Tech.) O. Krupchenko,
PhD (Tech.) P. Yurko, student D. Fenko

***Анотація.** Усадка бетону повітряно-сухого висихання починається з зовнішніх шарів, саме так внутрішні шари стиснуті, а зовнішні розтягнені. Такий напружений стан сприяє підвищенню міцності зразка на стиск. З часом проявляється повзучість, що скорочує внутрішні шари і збільшує зовнішні. Внутрішні шари, скорочуючись від усадки, стискають зовнішні шари. При навантаженні такого зразка стискальною силою перевантажені будуть зовнішні шари, що призведе до зниження міцності зразка. З часом усадка загасає, проявляється релаксація власних напружень, зменшується їхній негативний вплив на міцність бетону, тому міцність зростає. При водонасиченні бетонних зразків проявляється зворотний ефект.*

***Ключові слова:** власні напруження, міцність бетону, повзучість, усадка, релаксація, водонасичення.*

***Abstract.** Shrinkage of concrete air-dry drying begins with the outer layers, thus the interior layers are compressed and the outer layers are stretched. This own stressed state contributes to the strength the sample compression. This increase in strength is quite difficult to detect because it form increase with the strength of cement stone.*

In the described own stressed state creep of concrete in the outer layers with stretch appears with time, and the interior layers do in compression, which results of the size of the interior layers in decrease and of the size of the outer layers to increase. The interior layers, decreasing from shrinkage, compress the outer layers. In this sample loading compressive force will overload the outer layers, which will decrease the strength of the specimen.

With time shrinkage disappear and manifested relaxation own stress consequently decreases their negative influence on the strength of concrete, and so increases strength.

With water-saturation of concrete sample the opposite effect will appear. Water- saturation process begins with the surface sample. While swelling (when expending) causes the appearance of compressive own stressed in the outer layers and stretch in the interior layers. When tested in compression of the sample the outer layers will be overloaded and the strength of concrete will decrease.

This stressed state causes the creep in compressed outer layers and creep in the stretched interior layers that leads to partial relaxation of own tensions. Decreasing of own stress reduces their negative impact and the strength of concrete is increased after a temporary reduction. With time the

creep concrete (compressed in the core and stretched to the surface of sample) and relaxation of own stress diminishes their impact, which reduces the strength of concrete.

Described the impact of own stress on strength applies to other porous materials. Such conclusions are confirmed by many experiments in which the authors explain this phenomenon by adsorption effect and capillary compression.

It should also be noted that the physical mechanics of the impact of own stress on concrete strength is not substantiated.

Keywords: *own stresses, strength of concrete, creep, shrinkage, relaxation, water-saturation.*

Вступ. Міцність бетону змінюється в часі, а також залежить від умов зберігання, зволоження, висушування та власних напружень, викликаних усадкою, набряканням, повзучістю при тривалих навантаженнях.

Вплив структурних власних напружень на міцність бетону, викликаних тривалими стиском або розтягом, досліджувався в багатьох експериментах. Вплив нерівномірно розподілених по поперечному перерізу власних напружень на міцність бетону не досліджувався, хоча його доцільно вважати одним із факторів, що визначає міцність бетону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міцність бетону залежить від багатьох факторів, до яких у першу чергу належать склад бетону та умови його твердіння [1, 2], вік бетону [3], температура та вологість навколишнього середовища [4-7, 11-15], тому виділити окремо вплив власних напружень на міцність бетону досить складно. Щоб виявити вплив власних напружень, розподілених нерівномірно по поперечному перерізу, на міцність матеріалу, логічно було провести дослід на нестаріючому і непористому матеріалі. Таким матеріалом можна вважати метал [8].

Загальновідома послідовність руйнування металевих (крихких) зразків: при стиску руйнування зразків починається з зовнішніх шарів, а при розтязі – з внутрішніх. Таку послідовність руйнування можна пояснити впливом власних напружень, що з'являються при відливанні (прокатуванні) металу. Під час твердіння металевих зразків при їхньому відливанні охолодження починається з зовнішніх

шарів, отже температура зовнішніх шарів менша, ніж внутрішніх. При вирівнюванні температури зовнішні шари будуть стиснені, а внутрішні розтягнені. При випробуванні таких зразків на стиск власні напруження в зовнішніх шарах і напруження від зовнішнього навантаження (одного знака) будуть складатися, і руйнування зразка розпочнеться з зовнішніх шарів. При випробуваннях на розтяг перевантажені будуть внутрішні шари, і руйнування почнеться зсередини зразка.

Для підтвердження наведених висновків доцільно виготовити і випробувати зразки з протилежним за знаками полем власних напружень порівняно з полем напружень, що виникає при «природному» охолодженні, тобто щоб зовнішні шари були розтягнені, а внутрішні стиснуті.

Такі досліді були проведені на зразках із крихкого (силікатного) дюралюмінію. Зразки діаметром 30 мм і висотою 60 мм в кожній партії відливалися з однієї плавки. Зразки «природного» виготовлення відливалися в сталіні циліндри й охолоджувались із зовнішніх шарів.

Інші зразки розливалися у такі самі циліндричні сталеві форми зі встановленими по центру сталевими трубками. Форми були встановлені в електронагрівальні пристрої. Перед розливом дюралюмінію форми нагрівалися до температури плавлення дюралюмінію і по трубці пропускалась вода кімнатної температури. Отже, охолодження зразка при його твердінні відбувалося з внутрішніх шарів, що створювало поле власних

напружень, протилежне за знаком попередньому.

Результати випробувань підтвердили попередні висновки про вплив власних напружень на міцність дюралюмінію: зразки з протилежним «природному» полем власних напружень виявились міцнішими від зразків «природного» виготовлення в середньому на 20 % [8], тобто вплив власних напружень, нерівномірно розподілених по поперечному перерізу, у середньому складає 10 %.

Визначення мети та завдання дослідження. Недослідженим залишився вплив власних напружень на міцність при стиску бетону, а також інших пористих матеріалів. Метою проведених дослідів є визначення впливу нерівномірно розподілених по перерізу власних напружень на міцність бетону при стиску.

Основна частина дослідження. Складність дослідів із впливу власних напружень, викликаних усадкою, на міцність бетону полягає в тому, що інтенсивність і розподіл усадки по перерізу залежить від умов зберігання бетонних зразків.

При зберіганні зразків у повітряно-сухому середовищі усадка починається та інтенсивніше протікає на поверхні зразка і поступово проходить до внутрішніх шарів. При скороченні (за рахунок усадки) розмірів зразка на його поверхні виникають усадкові розтягувальні напруження, що стискуватимуть бетон у ядрі (центрі) зразка, і створюють умови до появи тріщин на поверхні зразка.

На початку навантаження такого зразка стискальною силою зовнішні шари стиснуті не будуть до величини навантаження, здатного компенсувати в них власні розтягувальні напруження.

Внутрішня частина зразка, стиснута власними напруженнями до прикладення зовнішньої сили, при навантаженні стискальною силою буде мати більші (сумарні) напруження, ніж зовнішні шари, і

тому має визначати міцність всього зразка. Однак внутрішня частина, хоч і перевантажена, але знаходиться в обіймі, створеній недовантаженими зовнішніми шарами. У результаті такий зразок у цілому має витримати більше зовнішнє навантаження, ніж зразок, без власних напружень. Загальновідомим є й ефект збільшення міцності при висушуванні бетону (він підтверджується численними експериментами). Продовжуючи аналіз впливу усадкових (нерівномірно розподілених по перерізу) напружень, можна прогнозувати можливе зниження міцності бетону в часі.

У згаданому вище напруженому стані виникає повзучість бетону в зовнішніх шарах від розтягу, а у внутрішніх від стиску. Паралельно з цим усадка просувається до внутрішніх шарів і в решті-решт досягає центральної частини зразка. У цей період інтенсивність усадки в зовнішніх шарах знизилася, бетон збільшився в розмірах за рахунок повзучості від розтягу власними напруженнями.

Внутрішні шари (ядро зразка), скорочуючись від усадки в розмірах, стискають зовнішні шари, перебуваючи самі в розтягнутому стані. Характерно те, що цей процес підсилюється отриманим скороченням внутрішньої частини за рахунок повзучості при стиску в початковий період усадки.

При навантаженні такого зразка стискальною силою перевантаженими будуть зовнішні шари, що знаходяться без обійми, і зразок зруйнується при меншому навантаженні, ніж зразок без власних напружень. На основі викладеного можна зробити висновок про можливе зниження міцності бетону в часі. Цей висновок підтверджується дослідом (рис. 1). У досліді С. А. Миронова в усіх бетонах (і природного твердіння, і в пропарюваних) спостерігається тимчасове зменшення міцності бетону [1].

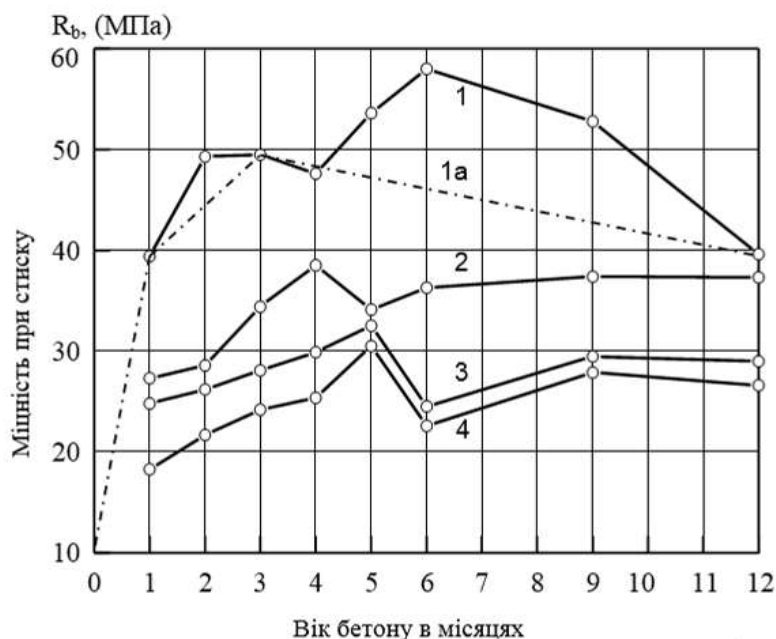


Рис. 1. Зміна в часі міцності бетону в дослідях С. А. Миронова

Через деякий час усадка бетону загасає, проявляється релаксація власних розтягувальних напружень усередині (ядрі) зразка і стискальних напружень у зовнішніх шарах, тобто зменшуються різниця (перепад) напружень у зовнішніх і внутрішніх шарах і, як наслідок, їхній негативний вплив на міцність бетону при стиску. Відбувається своєрідне «відновлення» (зростання) міцності бетону.

На рис. 1 показані діаграми зміни кубикової міцності при стиску бетону деяких зразків. Повторне зниження міцності бетону може бути додатково викликане релаксацією структурних власних напружень [3]. Такого зниження може й не бути залежно від властивості бетону (розмірів щебеню, водоцементного відношення, умов твердіння та ін.), а також умов зберігання.

Узагальнюючи аналіз впливу усадкових напружень (нерівномірно розподілених по поперечному перерізу) на міцність бетону при стиску, можна зробити висновок, що міцність бетону спочатку має збільшуватися, потім може наступити тимчасове зменшення міцності, після чого знову наступає збільшення міцності при

стиску. Ці висновки повністю підтверджуються дослідями С. А. Миронова та інших.

Діаграми могли мати й інший вигляд залежно від методики проведення дослідів. Наприклад, якщо побудувати діаграми за трьома точками, то повторного підвищення міцності бетону не буде (рис. 1, крива 1a). Такі результати були отримані в дослідях авторів роботи [2], у яких міцність бетону визначалася в чотирьох термінах (рис. 2, рис. 1, крива 1a), а не восьми, як у дослідях С. А. Миронова.

При водонасиченні бетонних зразків буде проявлятися протилежний ефект. Процес зволоження починається з зовнішніх шарів. Бетон набрякає (збільшується в розмірах), викликає стискальні власні напруження в зовнішніх шарах і розтягувальні у внутрішніх (центральных). При стиску такого зразка перевантаженими будуть зовнішні шари, але вони не знаходяться в обіймі (як внутрішні), і зразок почне руйнуватися з зовнішніх шарів, як наслідок, міцність зразка виявиться меншою, ніж міцність такого самого зразка без власних напружень, викликаних набряканням.

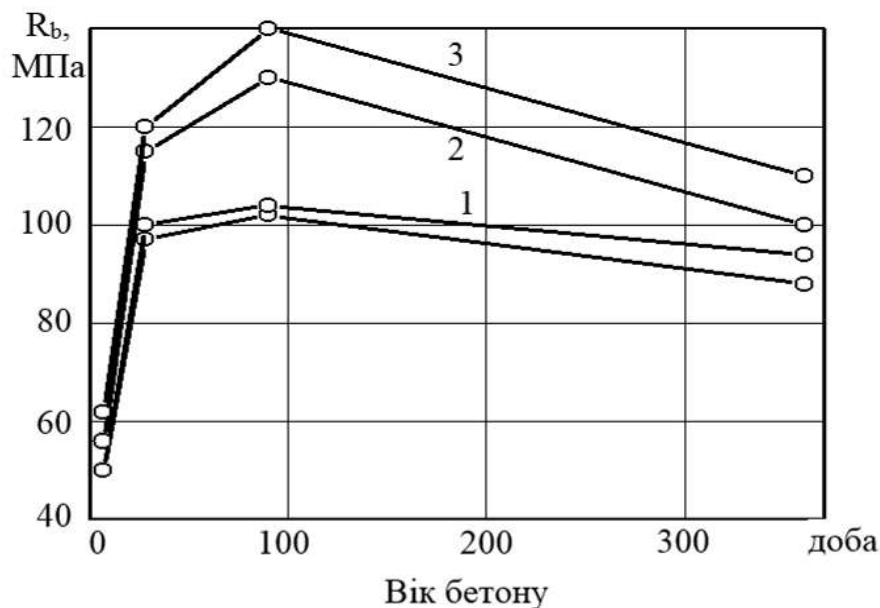


Рис. 2. Зміна міцності бетону (1), розчину (2) і цементного каменю (3) у часі в дослідях В. І. Ситника, Ю. А. Іванова

При такому напруженому стані проявляється повзучість стиснутого бетону в зовнішніх шарах і розтягнутого у внутрішній частині зразка, що призводить до часткової релаксації власних напружень. Зниження власних напружень зменшує їхній негативний вплив, і міцність бетону після тимчасового спаду підвищується.

Подальший процес набрякання центральної (внутрішньої) частини зразка створює поле власних напружень, протилежне описаному раніше. Поява такого поля власних напружень обумовлена тим, що повзучість бетону на початку водонасичення призвела до скорочення розмірів стиснутого бетону в зовнішніх шарах і збільшення його розмірів у внутрішній частині зразка. Набрякання внутрішніх шарів зразка (яке настає пізніше від зовнішніх) продовжує збільшувати їхні розміри, розтягуючи при цьому скорочені в розмірах зовнішні шари. Це призводить до ще більшого підвищення міцності бетону.

Повзучість бетону (стиснутого в ядрі перерізу і розтягнутого в зовнішніх шарах) і релаксація власних напружень зменшує

їхній позитивний вплив, тому міцність бетону поступово буде зменшуватись. Залежно від технології виготовлення та умов зберігання зразків зниження міцності може проявлятися в дуже різні терміни. Наведений характер зміни міцності бетону на стиск при його водонасиченні підтверджується дослідями різних авторів [7, 9], проаналізованими З. М. Цілоسانی [6].

Викликає інтерес і те, що описаний вплив водонасичення на міцність при стиску стосується не лише бетонів, а й інших пористих матеріалів. На рис. 3 наведені результати дослідів Русселя [6]. Руссель дослідив вплив зволоження гіпсу на його міцність при стиску.

Як видно з рис. 3, послідовність зміни міцності гіпсу на стиск при водонасиченні повністю збігається з описаним обґрунтуванням впливу власних напружень. Такі ж результати одержані в дослідях Щукіна, Дукаревича та ін. [9], які досліджували зміни міцності гідрооксиду магнію при насиченні його водою та етиловим спиртом (рис. 4).

З. М. Цілоسانی проаналізував причини впливу водонасичення на міцність пористих

матеріалів з використанням результатів експериментів різних дослідників [6]. Причини впливу зводились в основному до адсорбційного та капілярного обтиснення,

але такими факторами впливу води на міцність не вичерпуються всі можливі випадки її дії на бетон.

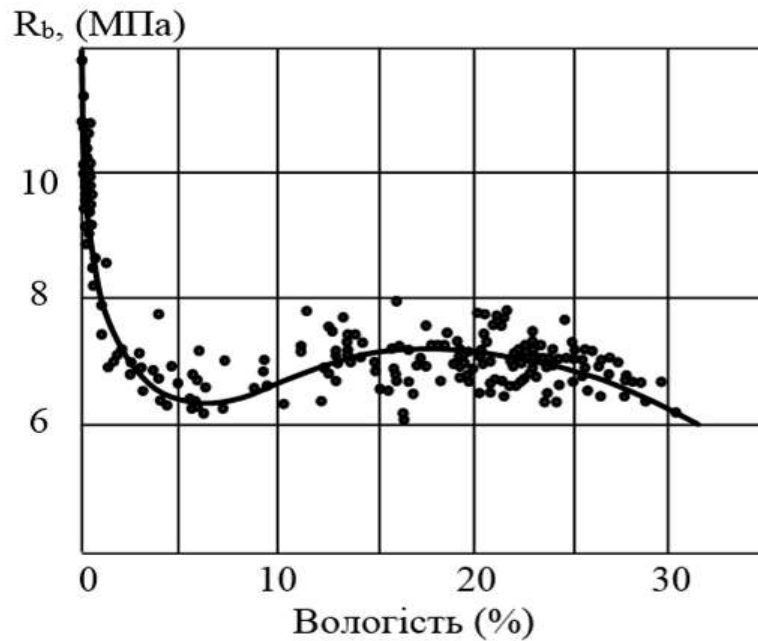


Рис. 3. Міцність гіпсових зразків при стиску залежно від вологості в дослідях Русселя [6]

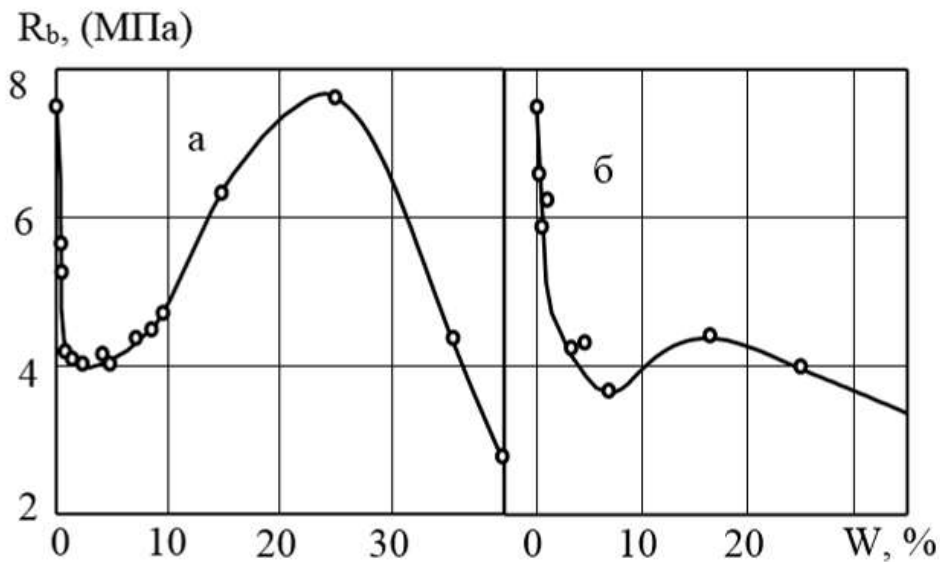


Рис. 4. Вплив насичення водою (а) та етиловим спиртом (б) гідроксиду магнію на його міцність при стиску

То ж не випадково в 60–70 роки ХХ століття в пресі з'явилися висновки деяких дослідників (В. В. Горохов, М. Т. Елбакідзе та ін.) про причетність власних напружень до впливу водонасичення і висушування на міцність бетону при стиску. Логічно також відзначити досліди С. В. Шестопова та Т. Ю. Любимової [6], у яких досліджувався вплив водонасичення і висушування бетону на його міцність при стиску. Автори дослідів дійшли такого висновку: «зміни міцності при висушуванні та зволоженні зразків безмежно оборотні», що виключає вплив додаткової гідратації цементу.

Подібні результати були одержані в дослідях К. М. Мілейковської [10], яка досліджувала «вплив зволоження на міцність бетону повітряно-сухого твердіння». Вплив зволоження на міцність бетону К. М. Мілейковська пов'язує з

розвитком деформацій набрякання. Зазначається також, що з припиненням об'ємних деформацій набрякання, зниження міцності бетону припиняється, а при тривалому водонасиченні міцність повністю відновлюється.

Висновки. Відновлення міцності бетону при стиску відбувається після релаксації власних напружень (про що йшлося раніше). Слід також зазначити, що в дослідях різних авторів фізична механіка впливу власних напружень на міцність бетону не наводиться, і для остаточного вирішення цього питання необхідні як експериментальні, так і теоретичні додаткові дослідження.

Наведений аналіз власних напружень у бетоні, нерівномірно розподілених по перерізу (викликаних усадкою або набряканням), підтверджує та обґрунтовує їхній вплив на міцність бетону при стиску.

Список використаних джерел

1. Расчет прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С. А. Миронов, И. М. Френкель и др. Москва: Стройиздат, 1973. 94 с.
2. Сытник В. И., Иванов Ю. А. Экспериментальные исследования прочности и деформативности высокопрочных бетонов. *Высокопрочные бетоны* / НИИСК Госстроя СССР. Киев: Будівельник, 1967. 122 с.
3. Фенко Г. А., Фенко А. Г. Влияние структурных напряжений на изменение прочности бетона во времени. *Бетон и железобетон в Украине*. 2002. № 3. С. 2-6.
4. Liu B. D., Lv W. J., Li L., Li P. F. (2014). Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 69. P. 133-142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.094>.
5. Semko O., Fenko O., Hasenko A., Harkava O. & Kyrychenko V. (2018). Influence of external and internal cooling at solidification on strength of brittle duralumin in compression. *MATEC Web of Conferences: 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings»*. 230: 02029.
6. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси: Мецниереба, 1979. 230 с.
7. Chen X., Huang W., Zhou J. Effect of moisture content on compressive and split tensile strength of concrete. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2012. Vol. 19. P. 427–435.
8. Фенко О. Г., Фенко Г. О. Вплив власних напружень на міцність матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць*. Рівне: НУВГП, 2013. Вип. 25. С. 466–471.
9. Zhang G., Li X. and Li Z. Experimental study on static mechanical properties and moisture contents of concrete under water environment. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, N. 10. P. 2962.

10. Милейковская К. М. Влияние водонасыщения бетона на его прочность и деформации. *Гидротехническое строительство*. 1960. № 4. С. 28–34.
 11. Zhang X. & Li Z. (2015). Effects of shrinkage and creep on cracking in concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 27(10). 04014219.
 12. Zhang X. & Li Z. (2017). Time-dependent behavior of concrete and its modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 29(1). 04016227.
 13. Zhang Y., Liu J. & Wang J. (2018). Experimental investigation of the effect of moisture content on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 155. P. 103-109.
 14. Khan M. I. & Bouasker M. (2012). Effect of saturation on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 26(1). P. 413-418.
 15. Chen Q., Wang D. & Li L. (2015). Experimental study on the mechanical behavior of concrete under different saturation conditions and high temperature. *Construction and Building Materials*. 81. P. 161-168.
-

Фенко Олексій Георгійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID ID: 0000-0002-3175-2892.

Тел.: +38 (097) 359-06-18. E-mail: fenko.aleksey@gmail.com.

Митрофанов Павло Борисович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID ID: 0000-0003-4274-1336.

Тел.: +38 (050) 849-22-88. E-mail: mytrofanov.p@gmail.com.

Крупченко Олександр Анатолійович, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». ORCID ID: 0000-0002-6075-5937. Тел.: +38 (095) 813-84-67.

Юрко Павло Анатолійович, кандидат технічних наук, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій». ORCID ID: 0000-0002-3485-435X. Тел.: +38 (066) 910-95-39.

Фенко Денис Олексійович, студент, група 101-ME, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Fenko Oleksiy, PhD (Tech). Associate Professor, department of building structures, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID ID: 0000-0002-3175-2892. Tel.: +38 (097) 359-06-18.

E-mail: fenko.aleksey@gmail.com.

Mytrofanov Pavlo, PhD (Tech). Associate Professor, department of building structures, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID ID: 0000-0003-4274-1336. Tel.: +38 (050) 849-22-88.

E-mail: mytrofanov.p@gmail.com.

Krupchenko Oleksandr, PhD (Tech). SE «State Research Institute for Building Constructions». ORCID ID: 0000-0002-6075-5937.

Yurko Pavel, PhD (Tech). SE «State Research Institute for Building Constructions». ORCID ID: 0000-0002-3485-435X.

Fenko Denys, student, Group 101-ME, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

Статтю прийнято 15.05.2023 р.

УДК 625.14:699.887

РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО ЕЛЕКТРОКОРОЗИЮ КОНСТРУКЦІЙ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЇХНЬОГО ЗАХИСТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Доктори техн. наук А. А. Плуґін, О. С. Борзяк, канд. техн. наук О. А. Плуґін, аспіранти О. П. Крикун, В. В. Зінченко

DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT ELECTRICAL CORROSION OF RAILWAY TRACK STRUCTURES AND IMPROVEMENT OF THEIR PROTECTION METHODS USING ELECTRICALLY CONDUCTIVE COMPOSITIONS

DSc (Tech.), Professor A. A. Plugin, DSc (Tech.) O. S. Borziak, PhD (Tech.) O. A. Pluhin, postgraduate students O. P. Krykun, V. V. Zincenko

Анотація. У дослідженні розглянуто розвиток уявлень про механізм протікання корозійних струмів через конструкції залізничної колії і споруд та обґрунтовано способи їхнього захисту від електрокорозії. У результаті теоретичних досліджень і натурних обстежень уточнено електричні кола струмів витoku від пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП, що виникає під час проходження електричного рухомого складу електрифікованими постійним струмом залізничними коліями. Встановлено носії струму в елементах і конструкціях колії і споруд. З'ясовано, що в залізобетонних шпалах, опорах пасажирських платформ через вплив ПОЕП утворюються зони нейтралізації і вилуговування бетону, катодна та анодна зони сталевих арматур. У цих зонах протікають відповідні хімічні та електрохімічні реакції вилуговування і карбонізації вапна, окиснення заліза тощо. Запропоновано запобігати корозійним процесам у цих зонах шляхом відведення струмів заземленими екранами-покриттями з електропровідних композицій на основі мінеральних в'язучих. Запропонований показник ефективності цих екранів-покриттів, що є ступенем зниження сили струму через конструкцію. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що він залежить від частки площі контакту сталевих заземлювачів з екраном від площі самого екрана, отримано відповідні залежності. Обґрунтовано нові способи захисту конструкцій колії і споруд від електрокорозії, розроблено відповідні конструктивно-технологічні рішення.

Ключові слова: електрифікована залізниця, постійний струм, залізнична колія, споруда, електрокорозія, мінеральні в'язучі, електропровідність, захист.

Abstract. Research is devoted to the development of ideas about the mechanism of the flow of corrosion currents through the structures of railway tracks and buildings and the justification of methods of their protection against electrical corrosion. As a result of theoretical studies and field tests, the electric circuits of the leakage currents from the pulsating unidirectional electric potential of the POEP, which arise during the passage of the electric rolling stock along the electrified direct current railway tracks, have been clarified. Current carriers are installed in the elements and structures of the track and buildings. In concrete, soil, which are conductors of the second kind, these carriers are mainly cations Ca^{2+} , Na^{+} , anions OH^{-} . It was found that in reinforced concrete sleepers, supports of passenger platforms due to the influence of POEP, zones of neutralization and leaching of concrete, cathode and anode zones of steel reinforcement are formed. Corresponding chemical

and electrochemical reactions of leaching and carbonization of lime, oxidation of iron, etc. occur in these zones. It is proposed to prevent corrosion processes in these zones by diverting currents with grounded screens-coatings made of electrically conductive compositions based on mineral binders - Portland cement with a complex chemical additive or sodium silicate and a filler - dispersed graphite. The proposed indicator of the effectiveness of these screens-coatings, which is the degree of reduction of the current strength through the structure. As a result of experimental studies, it was established that it depends on the share of the contact area of the steel grounding device with the screen from the area of the screen itself, and the corresponding dependencies were obtained. New methods of protecting track structures and structures from electrical corrosion are substantiated, and appropriate structural and technological solutions are developed.

Keywords: electrified railway, direct current, railway track, construction, electrocorrosion, mineral binders, electrical conductivity, protection.

Вступ. На сьогодні значна кількість вантажних і пасажирських перевезень у світі здійснюється залізницями. Найбільш економічно ефективними та екологічно чистими є електрифіковані залізниці. Але вони є джерелом струмів витоку, що надходять з рейок у конструкції, споруди, земляне полотно і далі вже як блукаючі струми розтікаються по землі, «шукаючи» напрямок до відсмоктувальних ліній контактної мережі. Значна кількість залізниць електрифікована постійним струмом, що спричиняє електрокорозійні пошкодження конструкцій, з яких стікає, і конструкцій, на які натікає вже як блукаючий струм. Проблеми запобігання електрокорозійним пошкодженням остаточно не вирішені навіть у розвинутих країнах, тому дослідження про розкриття механізмів електрокорозії конкретних конструкцій і способів захисту від неї залишаються актуальними.

Аналіз останніх досліджень і розробок. Відомо, що металеві конструкції та арматура залізобетонних конструкцій під дією постійних струмів, зокрема струмів витоку з рейкових колій електрифікованих постійним струмом залізниць, зазнають електрокорозії [1–5]. Електрокорозійні пошкодження, хоча і меншою мірою, спостерігаються навіть на сталевібробетоні [6]. Так, однією з конструкцій, що зазнає електрокорозійних пошкоджень, є залізобетонні опори високих пасажирських платформ (рис. 1). Можливо, через це в

1980-х роках на українських залізницях замість залізобетонних опор (рис. 1, а) як захід первинного захисту почали встановлювати більш масивні бетонні опори (рис. 1, б). Проте в роботі [5] встановлено, що в приарматурній зоні під впливом постійного струму бетон зазнає деструкції. У роботі [7] теоретично та експериментально доведено, що у випадку впливу пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП та відповідного струму, обумовлених режимом руху секціями електрифікованої колії, бетон у залізобетонних і навіть неармованих бетонних конструкціях також зазнає електрокорозії. Електрокорозія в цьому випадку полягає в інтенсивному електроміграційному вилугуванні вапна з цементного каменю.

У роботі [8] запропоновано схему стікання струму з електрифікованої постійним струмом залізничної колії на ділянках з позитивним ПОЕП на рейках та її натікання на навколишні конструкції, зокрема пасажирські платформи (рис. 1).

Із рис. 1 видно, що струм стікає переважно у вологу погоду, коли поверхні конструкцій і деталей вкриті плівкою води, через рейкові скріплення, шпали та баласт у земляне полотно, звідки натікає на вологу конструкцію, проходить через зону її електрокорозійного ураження 3, витікає в землю і поширюється нею 4. Оскільки металеві огорожі платформ обов'язково заземлені, частина струму 3 протікає через них. Запропоновані схеми рис. 1 не

деталізують протікання струму залізобетонними шпалами, не дають змогу з'ясувати механізм протікання струму через різні елементи утворених електричних кіл,

зокрема електрохімічні чи хімічні реакції, пов'язані зі струмом. Аналіз цих реакцій дасть змогу встановити механізми електрокорозії з метою її запобігання.

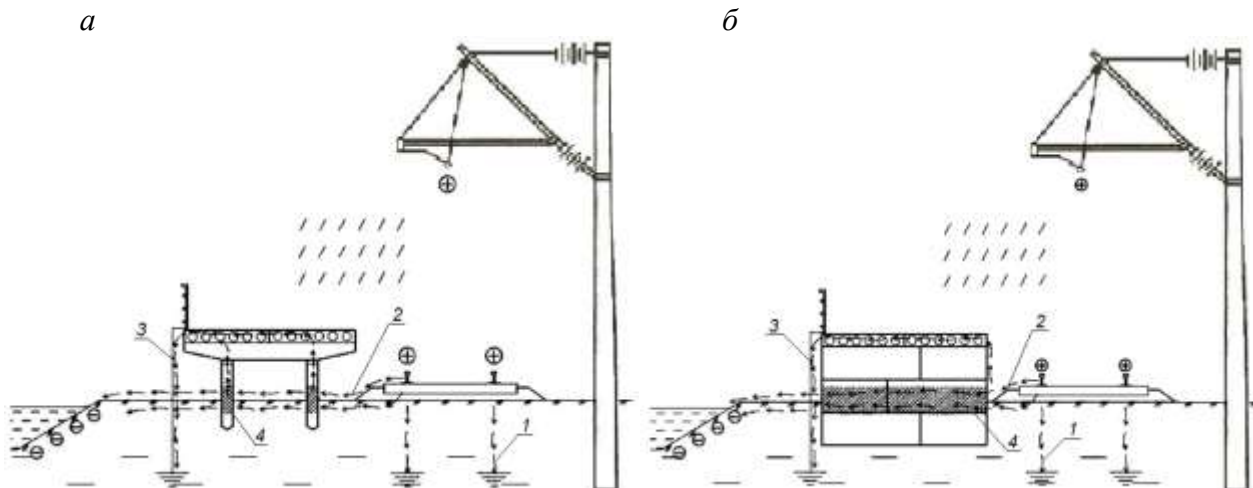


Рис. 1. Схема стікання струму з електрифікованої постійним струмом залізничної колії через залізобетонні шпали та конструкції високих пасажирських платформ на залізобетонних (а) і бетонних (б) опорах:

1 – струм витоку за сухої погоди; 2 – струм витоку за дощової погоди;
3 – струм витоку, відведений заземленням перил; 4 – зона конструкції опор, арматура та/або бетон якої зазнає електрокорозії

Способи ремонту і захисту від електрокорозії пасажирських платформ удосконалювались авторами робіт [8, 9]. Ремонт пошкоджених опор пасажирських платформ здійснюється, як правило, оштукатурюванням, заміною пошкоджених елементів новими збірними або монолітними елементами, у тому числі бетонуванням у незнімній опалубці (рис. 2). Конструкція, наведена на рис. 2, а, є сталобетонною обіймою, що підвищує несучу здатність конструкцій і забезпечує їхню повну водонепроникність. Металева оболонка повністю захищає бетон від корозії нейтралізації та вилуговування, а цементний камінь бетону пасивує, отже захищає внутрішню поверхню оболонки від електрохімічної корозії. Але в умовах впливу блукаючого струму металеве покриття зазнаватиме електрокорозії в його анодних зонах. Для захисту від

електрокорозії в роботі [8] запропоновано діодне заземлення (рис. 2, б, в), що захищає покриття шляхом перенесення анодних зон з оболонки на заземлення. Така конструкція фактично стає заземленим екраном, шунтом, який поглинає струм і відводить його в землю. Але сталобетонна конструкція металомістка та дорога, тому її доцільно застосовувати у випадку потреби відновлення несучої здатності суттєво пошкоджених опор.

У роботі [9] для зниження ресурсоемності ремонту і захисту подібних конструкцій запропоновано замість сталобетонних обійм використовувати екрани-покриття зі шпаклювальних електропровідних силікатних композицій (на основі силікату натрію, портландцементу) з графітовим порошком як наповнювачем (рис. 3). У результаті експериментальних досліджень встанов-

лено, що вони забезпечують зниження густини струму через конструкцію: покриття на основі силікату натрію, отвердженого кремнійфторидом натрію [10], – на 34–60 %, покриття на основі портландцементу з комплексною хімічною добавкою [11] – 49–66 %. У роботі [12] показано, що захисні властивості

заземленого екрана також залежать від частки площі контакту сталевго заземлювача з екраном-покриттям електропровідної композиції (рис. 3) і зростають зі збільшенням цієї частки площі контакту. Тому встановлення та використання цієї залежності для проектування захисту є актуальним завданням.

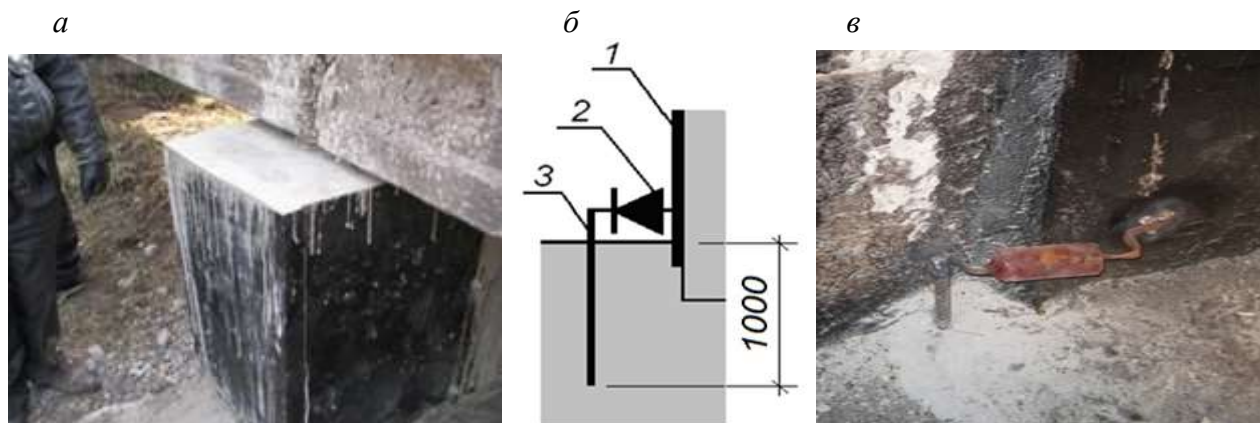


Рис. 2. Конструктивно-технологічне рішення ремонту бетонної опори високої пасажирської платформи шляхом заміни пошкодженої частини бетоном в незнімній опалубці:

a – загальний вигляд сталобетонної обойми; *б, в* – схема (*б*) і зовнішній вигляд (*в*) діодного заземлення для захисту від електрокорозії:

1 – сталева оболонка; *2* – діод; *3* – сталевий заземлювач

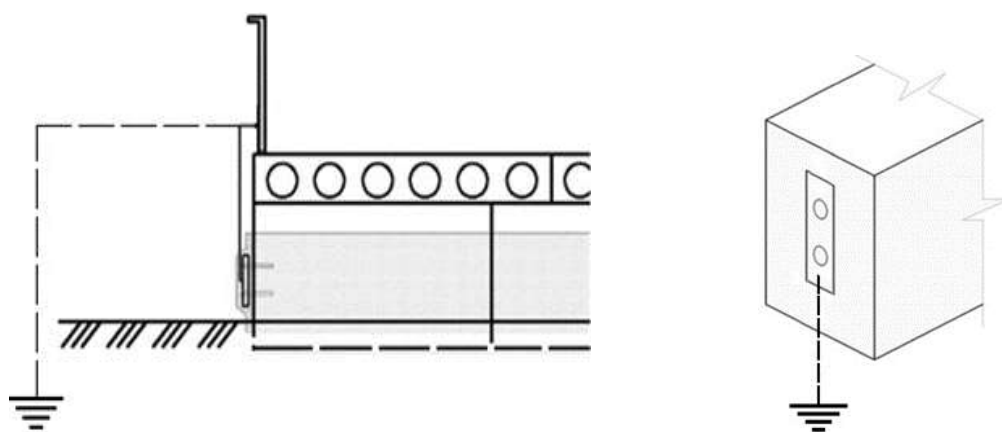


Рис. 3. Схема захисного екрана з електропровідної композиції, заземленого через металеву пластину

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є уточнений механізм протікання корозійних

струмів через конструкції залізничної колії і споруд і нові способи їхнього захисту від електрокорозії.

Отже, для досягнення мети передбачено виконання таких завдань досліджень: натурні обстеження пошкоджених конструкцій і споруд; теоретичне дослідження механізму протікання струму витоку крізь бетон, арматуру, ґрунт, аналіз корозійних реакцій на границях між ними; експериментальне дослідження ефективності заземлених екранів залежно від площі контакту екрана та заземлювача; обґрунтування конструктивно-технологічних рішень та організаційних заходів із захисту конструкцій і споруд від електрокорозії з застосуванням електропровідних композицій.

Основна частина дослідження.

Натурні обстеження пошкоджених конструкцій і споруд виконувалися дослідниками Українського державного університету залізничного транспорту на Львівській, Південній, Придніпровській залізницях, саме на яких найбільша кількість ліній електрифікована постійним струмом. На рис. 4, а-в, зображено рейки та проміжні рейкові скріплення в залізничних тунелях, де в багатьох випадках електрифіковані постійним струмом колії експлуатуються в умовах підвищеної вологості. Значні електрокорозійні пошкодження спостерігаються на підшвах рейок (рис. 4, а, б), підкладках (аж до повного руйнування кромки до отворів) (рис. 4, в), саме через які стікає струм. У залізобетонних шпалах часто спостерігаються пошкодження у вигляді подовжніх тріщин аж до розколювання шпал (рис. 4, г), однією з причин яких є електрокорозійне пошкодження арматури зі збільшенням її об'єму за рахунок продуктів корозії.

У шпалах виділяються також пошкодження у вигляді сітки мікротріщин на верхніх гранях шпал, через які спостерігається винос продуктів корозії, що в деяких випадках мають склоподібний вигляд, а потім темніють (рис. 4, д, е).

Більшість дослідників такі пошкодження пов'язують з внутрішньою корозією бетону, спричиненою реакцією між лугами цементу та реакційно здатними заповнювачами (Alkali-Silica Reaction ASR) [13–20]. Проте натурні обстеження показали, що такі пошкодження частіше зустрічаються на ділянках, електрифікованих постійним струмом, що може свідчити про прискорення та/або підсилення внутрішньої корозії під впливом електричних потенціалів і струмів.

На рис. 5 наведено конструкції високих пасажирських платформ на ділянці, електрифікованій постійним струмом. Як бачимо, електрокорозійних пошкоджень зазнають як залізобетонні стояки (подовжні тріщини на рис. 5, а), так і масивні бетонні (вилуговування бетону на рис. 5, б, руйнування ребер на рис. 5, в).

Такий характер усіх пошкоджень у цілому відповідає схемам рис. 1, отже корозійні процеси відбуваються саме в зазначених конструкціях, і на них доцільно зосередити увагу під час аналізу корозійних процесів.

Теоретичне дослідження механізму протікання струму витоку крізь бетон, арматуру, ґрунт, аналіз корозійних реакцій на границях між ними. Основними елементами ізоляції рейок від залізобетонних шпал є ізолюючі прокладки і втулки рейкових скріплень як клемно-болтових типу КБ, так і пружних анкерних типу СБЗ. Вони мають високий електричний опір і в суху погоду запобігають стіканню струму (рис. 6, а). Проте під час атмосферних опадів на поверхні рейок, скріплень, деталей ізоляції, шпал утворюються суцільні плівки води. У ці плівки з бетону дифундують дисоційовані аніони OH^- і катіони Ca^{2+} , надаючи їй властивості провідника другого роду і забезпечуючи на ділянках з позитивним потенціалом на рейках стікання з них струму (рис. 6, б).



Рис. 4. Електрокорозійні пошкодження елементів верхньої будови колії в тунелях без зворотного склепіння (з природною основною площадкою): Бескидському (старому) Львівській залізниці (а), Сухарному Придніпровської залізниці (б, в) і на ділянці Основа – Букине Південної залізниці (г–е):
а – шийки та підосви рейки, костильного скріплення Д0; б – шийки та підосви рейки, клемно-шурупного скріплення Д2; в – підкладок скріплення Д2;
г – арматури залізобетонних шпал типу СБ3; г–е – бетону шпал типу СБ3



Рис. 5. Електрокорозійні пошкодження опор високих пасажирських платформ на ділянці Харків-Пас. – Мерефа Південної залізниці: *а* – подовжні тріщини в залізобетонних стояках; *б, в* – патьоки вилуговування (*б*) і руйнування ребер (*в*) бетонних опор

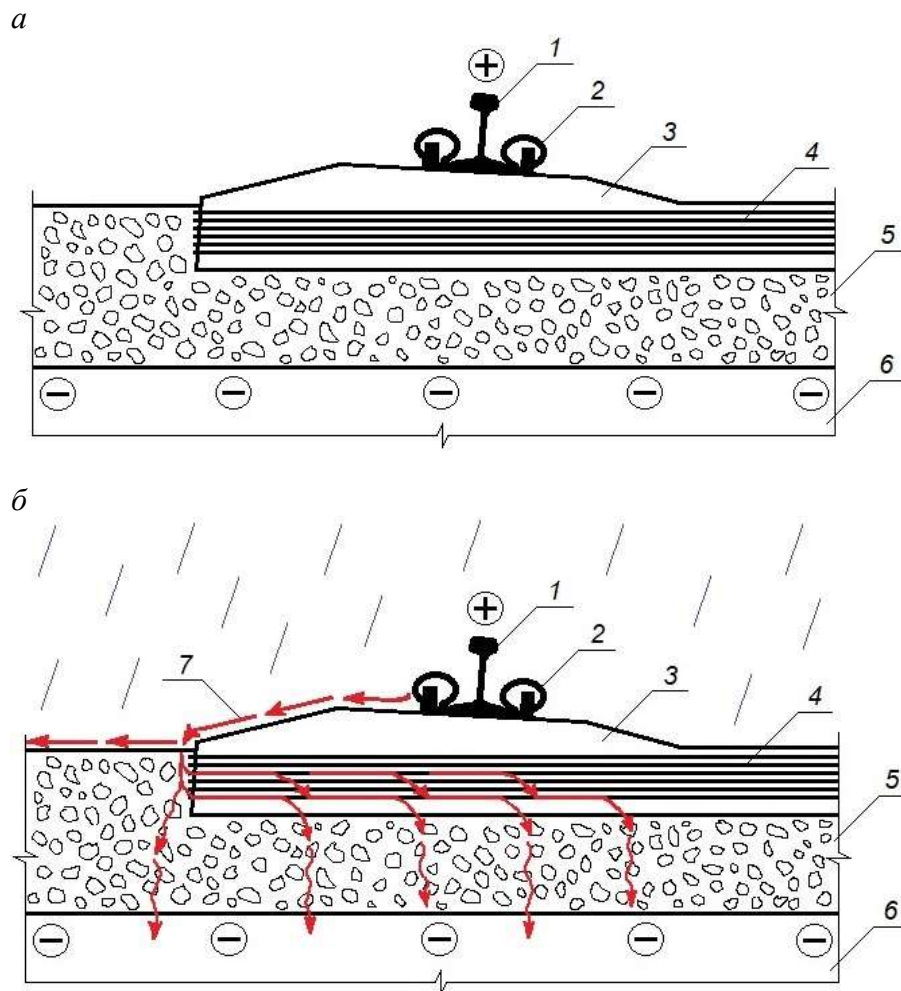
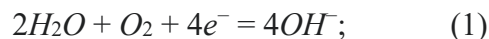


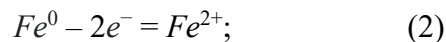
Рис. 6. Схема протікання струму витoku через шпали та баласт:
а – у суху погоду (струмом можна знехтувати); *б* – під час атмосферних опадів:
 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт;
 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм витoku

Технологія виробництва залізобетонних шпал, армованих попередньо напруженим високоміцним дротом, обумовлює виступ кінців дротин за торцеві поверхні шпал. ДСТУ Б В.2.6-209 [13] припускає такі випуски, обмежуючи їхню величину 20 мм. На нашу думку, ці випуски відіграють значну роль у стіканні струму. Через ці випуски струм потрапляє в арматуру і далі через бетон нижньої розтягнутої зони шпали під підрейковими площадками, у яких звичайно наявні заповнені електролітом мікротріщини, у баласт і землю основної площадки (рис. 6, б). Оскільки сталь арматури є провідником 1 роду, у місцях переходу струму між нею та електролітом поверхневої плівки, поровим електролітом бетону утворюються катодні та анодні ділянки, на яких відбуваються реакції:

- катодна (відновлення молекул води з утворенням гідроксил-іонів):



- анодна (окиснення і розчинення заліза):



- утворення продуктів корозії (іржі):

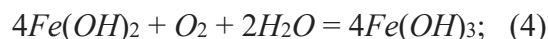
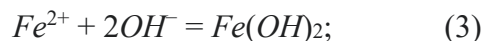


Схема протікання струму через бетон і арматуру шпали з урахуванням наведених реакцій подана на рис. 7, а. Ця схема узгоджується з характером корозійного руйнування шпал (рис. 4, г) – їхнім розколюванням по подовжнім тріщинам, утвореним за рахунок тиску на бетон продуктів корозії арматури.

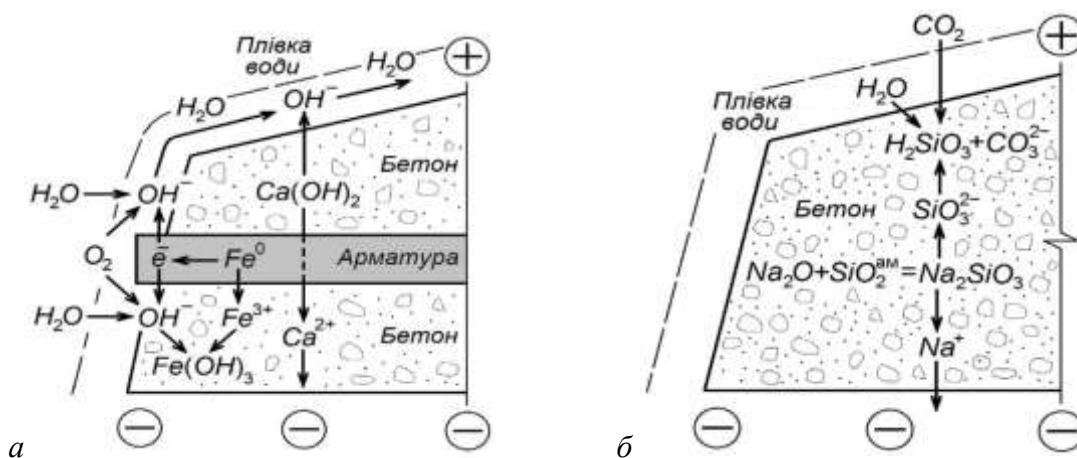


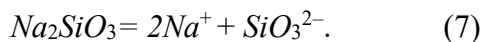
Рис. 7. Схема протікання струму через бетон і арматуру шпали та корозійних процесів:
 а – протікання струму через бетон і арматуру та електродокорозія арматури;
 б – інтенсифікація корозії бетону від ASR

Проте схема, наведена на рис. 7, а, не дає змогу пояснити причини утворення пошкоджень, наведених на рис. 4, д, е. Вважаємо, що наявність електричних потенціалів і струмів прискорюється внутрішньою корозією бетону, спричиненою

реакцією між лугами цементу і реакційно здатними заповнювачами або знижує порогові умови її протікання. Ця корозія обумовлена лужно-силікатною реакцією ASR:



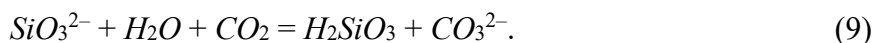
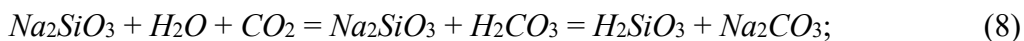
Утворений метасилікат натрію дисоціює на катіони натрію та силікатні аніони:



В електричному полі утворювані іони переносяться, забезпечуючи струм витоку.

Перенесення іонів обумовлює локальне зниження концентрації іонів Na^+ і SiO_3^{2-} і відповідно реакції ASR.

Метасилікат натрію та силікат-іон здатні взаємодіяти також з кислотами, зокрема вуглекислою (розчиненою у воді діоксидом вуглецю) з утворенням метакремнієвої кислоти:



Схема, що враховує наведені реакції та перенесення іонів, наведена на рис. 7, б. Метакремнієва кислота є основним продуктом корозії ASR (6), що відкладається у вигляді високодисперсного гелю, здатного до набухання за рахунок осмотичного тиску, який є однією з причин утворення сітки мікротріщин. Саме заповнені гелем кремнієвих кислот мікротріщини і спостерігаються на рис. 4, д, е.

Виконано аналіз протікання струму далі через баласт і ґрунт і конструкції пасажирських платформ, зокрема деталізовано схеми рис. 1. Виходячи з мінерального складу гранітів, ґрунтів, можна припустити, що в обводнених баласті та ґрунті як провіднику другого роду носіями струму є катіони Na^+ (K^+) та аніони OH^- . У поровому електроліті бетону носіями струму є продукти дисоціації гідроксиду кальцію – катіони Ca^{2+} та аніони OH^- , а у сталевій арматурі – електрони e^- . З урахуванням цього деталізовано схеми протікання струму через конструкції високих пасажирських платформ (рис. 8).

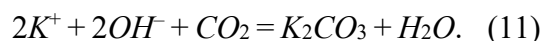
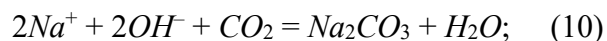
За умов проникності ґрунту і бетону для води і газів у кількості, достатній для хімічних реакцій, наявності у ґрунті та бетоні вільної води H_2O , а в повітрі кисню O_2 та діоксиду вуглецю CO_2 у залізобетонній конструкції утворюються

чотири зони, де протікають різні обмінні та електрохімічні реакції (рис. 8, а). Залежно від них ці зони в роботі [10] названо так: 1) зона нейтралізації бетону; 2) катодна зона арматури; 3) анодна зона арматури; 4) зона вилугування бетону. Оскільки в цій роботі враховано обмежену кількість реакцій, притаманних визначеним зонам, деталізуємо процеси в них.

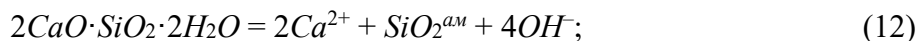
У бетонній конструкції утворюються лише дві зони (рис. 8, б) – нейтралізації та вилугування бетону.

У них протікатимуть наведені далі реакції:

1. У зоні нейтралізації бетону відбуваються обмінні реакції



Отже, у цій зоні відбувається нейтралізація OH^- , зниження pH порового електроліту бетону і подальше розкладання гідросилікатів кальцію $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$ і портландиту $Ca(OH)_2$ цементного каменю з утворенням в умовах дефіциту води нових порцій іонів Ca^{2+} , OH^- та аморфного кремнезему $SiO_2^{ам}$, а при її достатній кількості – кремнієвих кислот H_2SiO_3 , H_4SiO_4 ($Si(OH)_4$):



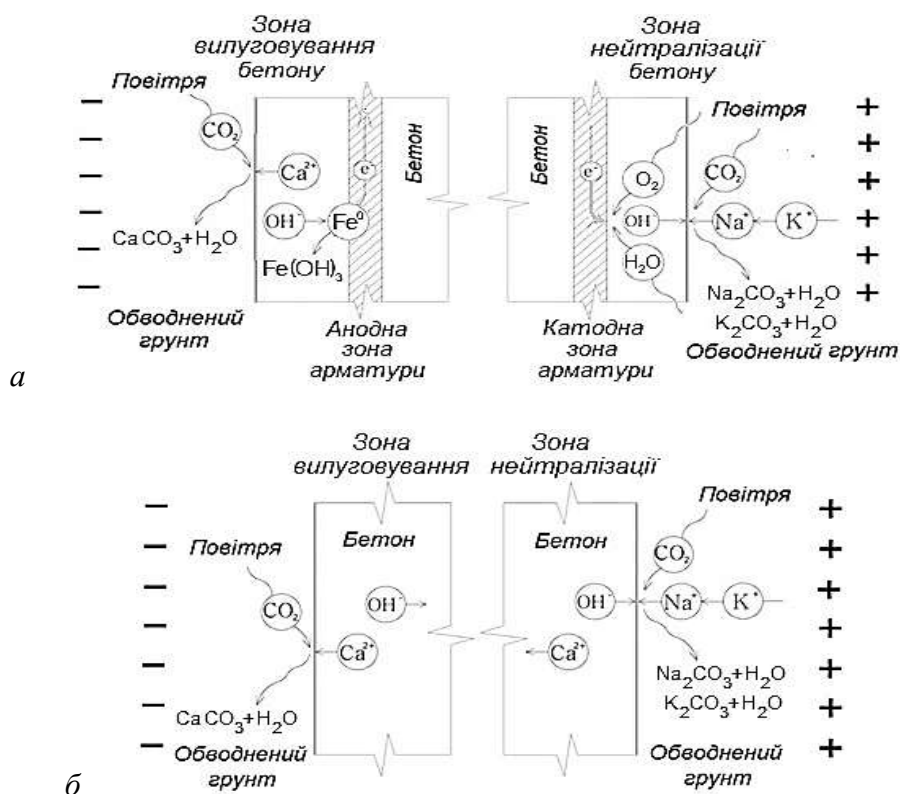
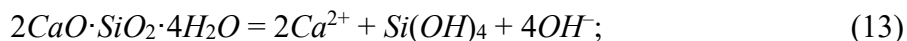


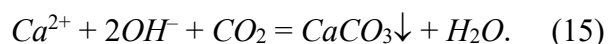
Рис. 8. Схема протікання струму через конструкції високих пасажирських платформ:
а – залізобетонні стояки (рис. 1, а); б – бетонні опори (рис. 1, б)

Утворені нові порції іонів Ca^{2+} , OH^- продовжують переносити електричний струм. Утворені замість $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$ і $Ca(OH)_2$ кремнієві кислоти і/або аморфний кремнезем не мають в'язучих властивостей, що обумовлює деструкцію бетону, зниження його міцності та морозостійкості, утворення та подальший розвиток пошкоджень, наведених на рис. 4.

2. У катодній зоні арматури, у яку перетікають електрони від анодних зон, відбувається електрохімічна реакція (1). Утворені нові порції аніонів OH^- продовжують переносити електричний струм поровим електролітом бетону. Корозія арматури в катодній зоні не відбувається, навпаки, у ній забезпечується її захист катодною поляризацією.

3. В анодній зоні арматури, з якої електрони перетікають до катодних зон, послідовно відбуваються електрохімічна та обмінні реакції (2)–(5). Саме в анодній зоні відбувається інтенсивна електрокорозія сталевих арматур, продуктом якої є іржа (переважно $FeO(OH)$). Об'єм іржі набагато більший, ніж вихідного металевих заліза, тому в приарматурній зоні бетону виникають значні внутрішні напруження, що обумовлюють утворення тріщин і відшарування захисного шару (рис. 5, а).

4. У зоні вилугування бетону відбувається винесення на його поверхню катіонів Ca^{2+} та обмінна реакція карбонізації



У цій зоні на поверхні бетону спостерігаються інтенсивні висоли, що свідчать про інтенсивне вилуговування (рис. 5, б). Вилуговування, як і в зоні нейтралізації бетону, обумовлює зниження pH з втратою захисних властивостей відносно арматури. Утворені нові порції іонів Ca^{2+} , OH^- продовжують переносити електричний струм. Утворені замість $nCaO \cdot SiO_2 \cdot mH_2O$ і $Ca(OH)_2$ кремнієві кислоти і/або аморфний кремнезем не мають в'язучих властивостей, що обумовлює деструкцію бетону, зниження його міцності та морозостійкості, утворення та подальший розвиток пошкоджень, наведених на рис. 5, в.

Отже, внаслідок теоретичних досліджень, узгоджених з результатами натурних обстежень, встановлено, що в електричних колах струмів витоку від ПОЕП, що виникає під час проходження електричного рухомого складу електрифікованими постійним струмом залізничними коліями, носієм струму є: у рейках, сталевих деталях рейкових скріплень, сталевій арматурі – електрони e^- ; поровому електроліті бетону та плівках вологи на поверхнях конструкцій – переважно катіони Ca^{2+} та аніони OH^- ; баласті та ґрунті – катіони Na^+ та K^+ .

У залізобетонних шпалах у вологу погоду струм натікає поверхнею деталей ізоляції рейкових скріплень через випуски арматури на торцях шпал на арматуру, на поверхні якої в зоні натікання струму утворюються катодні зони, а в глибині бетону – анодні зони. У катодних зонах утворюються гідроксил-іони, що поповнюють поровий електроліт бетону та електроліт поверхневих плівок вологи. В анодних зонах відбувається розчинення заліза, утворення катіонів Fe^{2+} , Fe^{3+} і гідроксидів заліза – іржі, яка, збільшуючись в об'ємі, спричиняє внутрішній тиск на бетон і утворення у шпалах подовжніх тріщин аж до розколювання шпал. ПОЕП також інтенсифікує внутрішню корозію бетону від лужно-силікатної реакції ASR

або знижує пороги умов її протікання. Утворений внаслідок ASR метасилікат натрію дисоціює на катіони Na^+ та силікат-іони SiO_3^{2-} , що під впливом ПОЕП забезпечують струм витоку. Перенесення іонів обумовлює локальне зниження їхньої концентрації та відповідно інтенсифікацію реакції ASR. Під верхньою гранню шпал силікат-іони взаємодіють з розчиненим у плівках вологи діоксидом вуглецю повітря з утворенням кремнієвих кислот, що відкладаються у вигляді високодисперсного гелю, здатного до набухання за рахунок осмотичного тиску, що є однією з причин утворення сітки мікротріщин. Отже, у шпалах утворюються умовні зони, у яких протікають відповідні реакції: 1) під верхньою гранню шпали – зона лужносилікатної реакції ASR (у випадку підвищеного вмісту луг у цементі та реакційно-здатних заповнювачів); 2) на арматурі біля торців шпал – катодна зона, у якій відбувається електрохімічне утворення гідроксил-іонів OH^- ; 3) на арматурі всередині шпали – анодна зона, у якій відбувається анодне розчинення заліза і утворення його гідроксидів; 4) нижній грані шпали – зона вилуговування, з якої в баласт і ґрунт стікають катіони Ca^{2+} , Na^+ .

У залізобетонних і бетонних конструкціях високих пасажирських платформ внаслідок впливу ПОЕП і протікання струму витоку утворюються зони, у яких протікають відповідні реакції: 1) зона нейтралізації бетону – карбонізація з утворенням карбонатів; 2) катодна зона арматури – електрохімічне утворення гідроксил-іонів OH^- ; 3) анодна зона арматури – анодне розчинення заліза і утворення його гідроксидів; 4) зона вилуговування бетону – винесення з бетону катіонів Ca^{2+} і їхня карбонізація на поверхні.

Експериментальне дослідження ефективності заземлених екранів залежно від площі контакту екрана та заземлювача здійснено на композиціях із електропровідних композицій з графітовим наповнювачем на основі портландцементу і силікату

натрію, отвердженого кремнефторидом натрію. Склади композицій прийняті за роботами [10, 11]. Дослідження проводили на моделях, які піддавали електричному впливу, і вимірювали характеристики цього впливу за допомогою методів і схем, запропонованих у роботі [9]. Моделі та електричну схему дослідження (рис. 9) розроблено на підставі схеми протікання блукаючого струму через опори високої пасажирської платформи на ділянці колії з позитивним ПОЕП на рейці (рис. 6). Модель є призмою 1 з бетону міцністю 20 МПа зі встановленим у ній сталевим стрижнем 2. Бетон між стрижнем і зовнішньою гранню призми відповідає бетону конструкції між її сторонами (рис. 1, 5). Модель-призму встановлювали в модель ґрунту – водонасичений дуже дрібний пісок 4, засипаний у металеву ємність 3. Струм, що

протікає через бетон і арматуру від рейок, імітували струмом, створюваним різницею потенціалів 40 В між ємністю 3 і арматурним стрижнем 2. Силу струму вимірювали за допомогою увімкнутих у кола мікроамперметрів (цифрових мультиметрів Sanwa PC510) 8 і 9. Частку площі контакту сталевого заземлюючого електрода з екранним покриттям X , яку варіювали в процесі дослідження, визначали як відношення площі контакту сталевого електрода з екранним покриттям S_e до площі всього екранного покриття S_p , %,

$$X = 100S_e/S_p. \quad (16)$$

Вимірювання проводили одночасно на моделях без захисту і з захистом впродовж 240 годин з інтервалом 24 години.

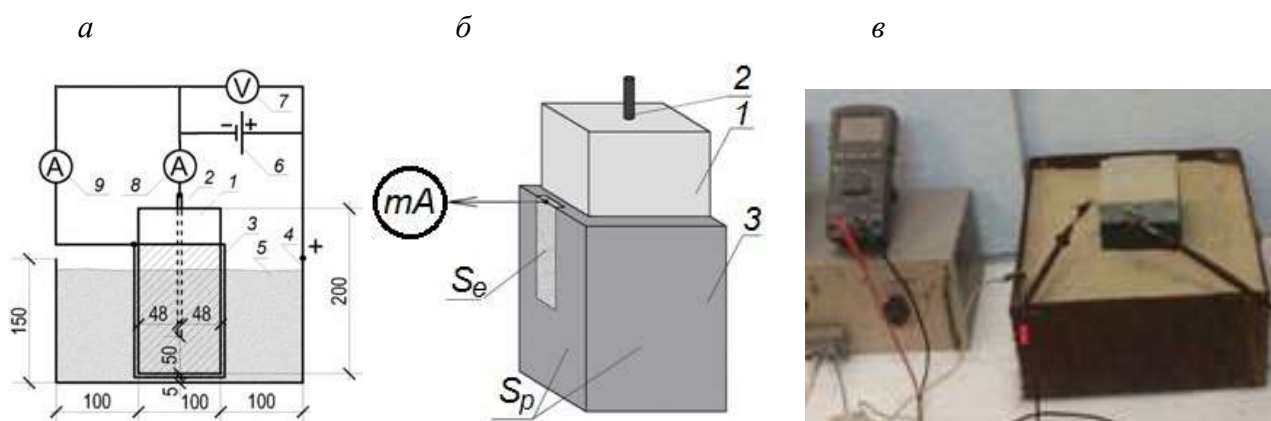


Рис. 9. Експериментальне дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій для захисту конструкцій від електрокорозії:

a – загальна схема; *б* – модель з покриттям; *в* – загальний вигляд;

1 – бетон; 2 – арматурний стрижень; 3 – захисний екран (покриття); 4 – сталева ємність; 5 – водонасичений пісок; 6 – джерело струму; 7 – вольтметр; 8 – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає через бетон, I_b ; 9 – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає через захисний екран і землю, I_e (у моделі без захисного екрана відсутній)

Показник ефективності захисту E_z оцінювали за формулою

$$E_z = (I_{b0} - I_b)/I_{b0} = 1 - I_b/I_{b0}, \quad (17)$$

де I_{b0} – сила струму через бетон моделі опори без захисного екрана, мА;

I_b – сила струму через бетон моделі опори із захисним екраном, мА. Значення I_{b0} та I_b

брали максимальні за період спостереження 240 годин.

Найвищому ступеню захисту відповідає $E_3 = 1$, відсутності захисту – $E_3 = 0$.

За результатами дослідження побудовано графіки залежності ефективності захисту E_3 від частини площі контакту заземлювача з екранним покриттям X (рис. 10). Із рис. 10 видно, що

ефективність захисту зі збільшенням X до 5 % зростає швидко, після 5 % – повільно. Ліву частину отриманих графіків до значення $X = 5\%$ апроксимували поліномами другого ступеня і шляхом їхнього диференціювання знайшли оптимальні значення X , після подальшого збільшення яких зростанням E_3 можна знехтувати.

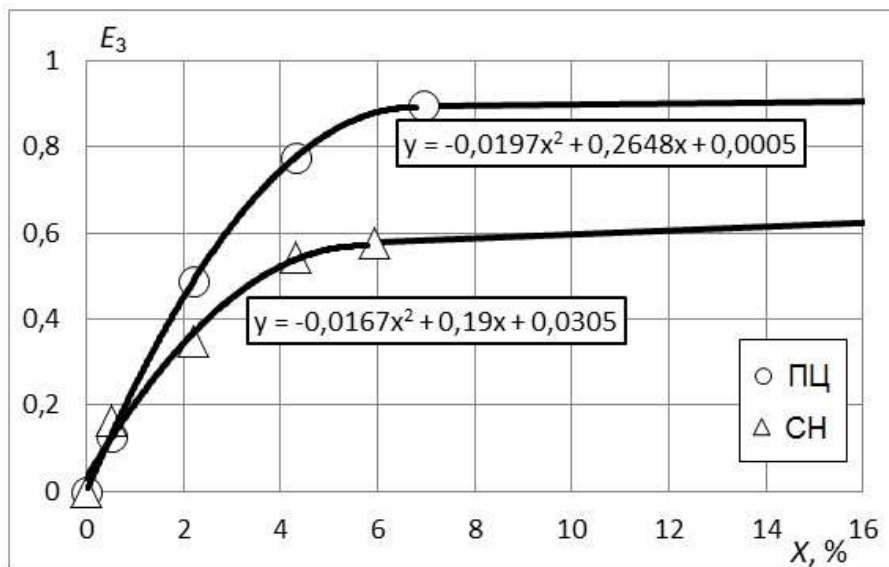


Рис. 10. Залежність показників ефективності захисту E_p із заземленими екранами з електропровідних композицій на основі портландцементу ПЦ і силікату натрію СН від площі контакту сталевго заземлювача з екраном X

Для захисного покриття складом на основі портландцементу

$$Y = -0,0197X^2 + 0,2648X; \quad (18)$$

$$Y' = 2 \cdot 0,0197X - 0,2648; \quad 0,0394X - 0,2648 = 0;$$

$$X = 6,72; \quad Y = E_3 = 0,89.$$

Для захисного покриття на основі силікату натрію

$$Y = -0,0167X^2 + 0,19X + 0,0305; \quad (19)$$

$$Y' = 2 \cdot 0,0167X - 0,19; \quad 0,0334X - 0,19 = 0;$$

$$X = 5,69; \quad Y = E_3 = 0,57.$$

Отже, для ґрунтованого екрана з композицією на основі портландцементу оптимальний захисний ефект $E_3 = 0,89$ досягається при частці площі контакту сталевго ґрунту від площі екрану $X = 6,7\%$. Для заземленого екранного покриття композицією на основі силікату натрію оптимальний захисний ефект $E_3 = 0,57$ досягається при частці площі контакту сталевго заземлювача від площі екрану $X = 5,7\%$.

Обґрунтування конструктивно-технологічних рішень та організаційних заходів із захисту конструкцій і споруд від електрокорозії з застосуванням електропровідних композицій. Виходячи з визначеного механізму протікання струму

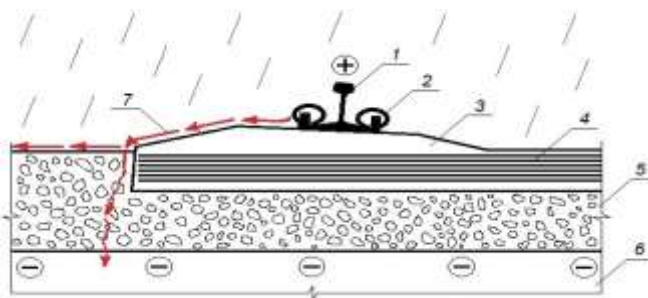
витоку через бетон і арматуру шпал, узгодженого з результатами обстеження шпал, як захід первинного захисту шпал запропоновано усунути виступ арматури з торців шпал і забезпечити захисний шар бетону не менше 10 мм. У цьому випадку у вологу погоду струм буде стікати переважно в баласт і земляне полотно, майже не проходячи через шпали (рис. 11, а), що мінімізує описані вище корозійні процеси та спричинені ними під час експлуатації пошкодження, наведені на рис. 4, г-е.

Оскільки особливості технології виробництва шпал не дають змогу забезпечувати такий захисний шар безпосередньо під час їхнього формування, на торцях шпал, передбачених для укладання на електрифікованих постійним струмом ділянках, після їхнього розпалублення рекомендується зрізати виступи

арматури і наносити на торці двошаровий захисний шар із композиції на основі портландцементу. Перший шар – із композиції проникної дії, що забезпечить ущільнення бетону, кольматацію в ньому мікротріщин від попереднього натягу арматури та власне створення захисного шару. Другий шар – із електропровідної композиції, що у вологу погоду забезпечить відведення струму витоку від шпали (рис. 11, б).

У випадках, коли на ділянках, електрифікованих постійним струмом, під час капітального ремонту передбачене укладання старопритатних шпал, ці шпали рекомендується на базах КМС попередньо готувати до збирання рейкошпальної решітки. Ця підготовка має полягати у зрізанні з торців шпал випусків арматури і нанесенні на них двошарового захисного шару, як запропоновано вище для нових шпал.

а



б

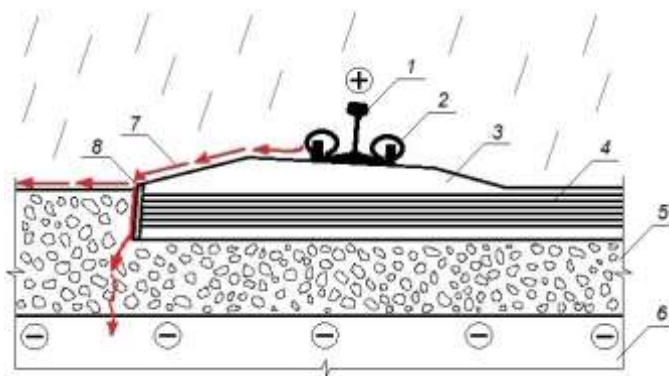


Рис. 11. Схема протікання струму витоку через шпалу та баласт під час атмосферних опадів:
а – за наявності на торцях захисного шару бетону; б – за наявності на торцях двошарового захисного покриття з електропровідним зовнішнім шаром; 1 – рейка; 2 – рейкове скріплення; 3 – бетон шпали; 4 – арматурний дріт; 5 – баласт; 6 – земляне полотно; 7 – струм витоку; 8 – двошарове захисне покриття

Проте ці заходи захисту мінімізують струми лише через шпали і не впливають на струми через конструкції високих пасажирських платформ. Розроблено конструктивно-технологічне рішення захисту бетонних опор пасажирських платформ заґрунтованих екранним покриттям з електропровідних композицій, у якому забезпечується оптимальна частка

площі контакту сталевго заземлювача з екранним покриттям $X = 6,9 \%$ (рис. 12).

Розроблено комплекс заходів із ремонту і захисту від електрокорозії бетонних і залізобетонних опор пасажирських платформ на ділянках залізниць, електрифікованих постійним струмом (у місцях позитивного потенціалу на рейках). Заходи обираються залежно від стану опори (таблиця).

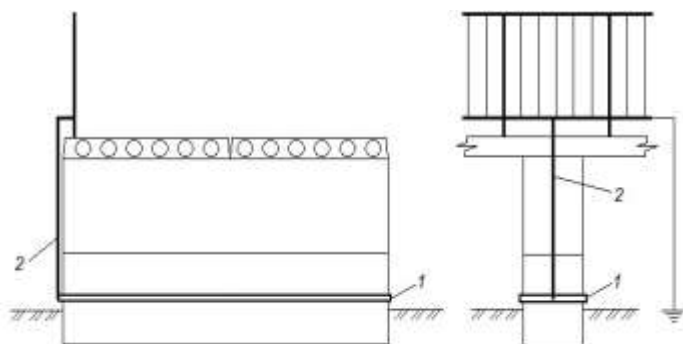


Рис. 12. Конструктивно-технологічне рішення захисту опори пасажирської платформи з заземленим екраном з електропровідної композиції:

1 – електрод – сталеві смуга шириною 40–50 мм, товщиною 3–5 мм, що кріпиться анкерами;
2 – сталевий провідник $\varnothing 10$ мм

Таблиця

Заходи з ремонту і захисту бетонних і залізобетонних опор пасажирських платформ залежно від їхнього стану в місцях позитивного потенціалу на рейках

Характер впливу та пошкоджень	Заходи ремонту і захисту
Струм витоку критичний, проте пошкоджень досі нема	Захисний екран товщиною 3–5 мм із електропровідної силікатної композиції з графітовим наповнювачем
Пошкодження не знижують несучу здатність, проте знижують довговічність	Ремонт поверхні та захист захисним екраном товщиною 7–10 мм з електропровідної композиції на основі портландцементу і комплексної хімічної добавки з графітовим наповнювачем
Пошкодження знижують несучу здатність	Сталобетонна або металоін'єкційна обойма з діодним заземленням
Пошкодження критичні та призводять до надзвичайної ситуації	Заміна опори на нову конструкцію з заземленим екранним покриттям товщиною 3–5 мм із електропровідних силікатних композицій з графітовим наповнювачем

Висновки

1. У результаті теоретичних досліджень і натурних обстежень уточнені

електричні кола струмів витоку від постійного однонаправленого електричного потенціалу ПОЕП, що виникає під час

проходження електричного рухомого складу електрифікованими постійним струмом залізничними коліями. У цих колах носіями струму є: у рейках, сталевих деталях скріплень, арматурі – електрони e ; поровому електроліті бетону та плівках вологи на поверхнях конструкцій та ізолюючих деталей – іони Ca^{2+} і OH^- ; баласті та ґрунті – іони Na^+ і K^+ .

2. Уточнено механізм протікання струмів через конструкції колії і споруд. У залізобетонних шпалах через вплив ПОЕП утворюються зони, у яких протікають відповідні реакції: під верхньою гранню шпали – зона лужносилікатної реакції ASR (у випадку підвищеного вмісту лугу у цементі та реакційно-здатних заповнювачах); на арматурі біля торців шпал – катодна зона, у якій відбувається електрохімічне утворення іонів OH^- ; арматурі всередині шпали – анодна зона, у якій відбувається анодне розчинення заліза і утворення його гідроксидів – іржі; нижній грані шпали – зона вилуговування, з якої у баласт і ґрунт стікають іони Ca^{2+} , Na^+ . У залізобетонних конструкціях високих пасажирських платформ утворюються зони, у яких протікають такі реакції: нейтралізації бетону – карбонізація з утворенням карбонатів; катодна та анодна арматури; вилуговування бетону – винесення іонів Ca^{2+} і їхня карбонізація на поверхні. Корозійним процесам у цих зонах можна запобігти шляхом усунення електричного струму через конструкцію, у т. ч. шляхом

його відведення заземленими екранами-покриттями з електропровідних композицій.

3. Запропоновано показник ефективності заземлених екранів-покриттів з електропровідних композицій на основі мінеральних в'язучих, що є ступенем зниження сили струму через конструкцію. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що він залежить від частки площі контакту сталевого заземлювача з екраном від площі самого екрана. Для екранів із композицій на основі портландцементу і силікату натрію оптимальний показник ефективності 0,89 і 0,57 досягається при частці 6,7 і 5,7 % відповідно.

4. Обґрунтовано нові способи захисту конструкцій колії і споруд від електрокорозії, розроблено відповідні конструктивнотехнологічні рішення. Для залізобетонних шпал запропоновано усунути виступ арматури з торців і влаштувати на них двошаровий захисний шар із композицій на основі портландцементу: перший шар – із композиції проникної дії, що ущільнить бетон, другий – із електропровідної композиції, що забезпечить відведення струму витоку від шпали. Для залізобетонних і бетонних опор високих пасажирських платформ запропоновано захист зазначеними екранами-покриттями, а також порядок вибору заходів із їхнього ремонту і захисту залежно від ступеня пошкодження.

Список використаних джерел

1. Thorsten Eichler, Bernd Isecke. Stray current-induced corrosion in cathodic protection installations of steel-reinforced concrete structures: FEM study of the critical parameters. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011620>.
2. Liu Y.-C., Chang E.-C., Shyu J.-L. and Chen X.-G. Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems. *International Journal of Electrical Energy*. 3(4). 257-261 (2015).
3. Duranceau S. J., Johnson W. J., Pfeiffer-Wilder R. J. A study examining the effect of stray current on the integrity of continuous and discontinuous reinforcing bars. *Experimental Techniques*. 35 (2011). 53-58.

4. Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Pietro Pedferri. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current. *Corrosion Science*. 49 (2007). 1056–1068.
5. Старосельський А. А. Електрокорозія залізобетону. Київ: Будівельник, 1978. 168 с.
6. Kangkang Tang. Stray current induced corrosion of steel fibre reinforced concrete. *Cem. Concr. Res.* 100. 445-456 (2017).
7. Пługін О. А. Дослідження впливу величини напруги пульсуючого однонаправленого електричного поля на електрокорозію бетону. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2010. Вип. 115. С. 56-67.
8. Пługін О. А., Борзяк О. С., Дудін А. А. Захист металевих і залізобетонних споруд залізничного транспорту від електрокорозії за допомогою діодного заземлення. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. 2011. Вип. 127. С. 204-212.
9. Plugin Dmytro, Kasyanov Vladimir, Konev Vitalii, Nesterenko Sergii and Afanasiev Aleksander. Research into the effectiveness of grounded screens of electroconductive silicate compositions for electrocorrosion protection. *Matec Web of Conf.* 116. 01012 (2017). DOI: 10.1051/mateconf/201711601012.
10. Конєв В. В. Електропровідна силікатна композиція для захисту від електрокорозії залізничних конструкцій: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 338 с.
11. Касьянов В. В. Електропровідне покриття для захисту від електрокорозії та ремонту залізничних конструкцій: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 281 с.
12. Plugin A., Borziak O., Kaliuzhna O., Krykun O., Zhuravel V. Protection Against Electrical Corrosion of Railway Constructions by Grounded Screens from Silicate Compositions (Online). *Internat. Scient. Confer. on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies BulTrans-2022*. URL: <http://bultrans.org/BulTrans-2022-program.pdf>.
13. Stark J., Wicht B. Dauerhaftigkeit von beton. Architektur und Bauwesen Weimar Universität. (1995). 100 p.
14. Stark J. Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Bauhaus Universität Weimar (2008) 139 p.
15. Kurdowski W. Chemia Cementu i Betonu. Kraków. (2010). 728 s.
16. Петрова Т. М., Сорвачова Ю. А. Внутренняя коррозия бетона как фактор снижения долговечности объектов транспортного строительства. Наука и транспорт. *Транспортное строительство*. 2012. № 4. С. 56–60.
17. Пшінько П. О. Підвищення надійності залізничних залізобетонних шпал: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. 20 с.
18. Коваленко В. В., Заяць Ю. Л., Пшінько П. О. Дослідження причин передчасного руйнування залізобетонних шпал на Знам'янській дистанції колії ПЧ-10 Одеської залізниці. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. 2015. № 6. С. 149–163.
19. Mindess S. Resistance of concrete to destructive agencies Lea's Chemistry of Cement and Concrete (2019). 251-283.
20. Krivenko P., Gelevera O., Kovalchuk O., Bumanis G., Korjakins A. Alkali-aggregate reaction in alkali-activated cement concretes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 660(1) (2019). 012002.

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076.

Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Борзяк Ольга Сергіївна, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936.

E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Плугін Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039.
E-mail: pluhin_bmg@kart.edu.ua.

Крикун Оксана Петрівна, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: krikun@kart.edu.ua.

Зінченко Владислава Володимирівна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501.
E-mail: zinchenko@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58.
E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Borziak Olga, PhD (Tech), associate professor, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-8815-6936. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Pluhin Oleksii, PhD (Tech), associate professor, department of Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4627-1039. E-mail: pluhin_bmg@kart.edu.ua.

Krykun Oksana, postgraduate student, department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-4731-179X. E-mail: krikun@kart.edu.ua.

Zinchenko Vladyslava, postgraduate student, department of building materials and structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6701-5501. E-mail: zinchenko@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 20.06.2023 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 629.463.65:621.863

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІВВАГОНА ПРИ РОЗВАНТАЖЕННІ РОТОРНИМ ВАГОНОПЕРЕКИДАЧЕМ

Канд. техн. наук Р. І. Візняк

DETERMINATION THE PARAMETERS OF STRESSED AND DEFORMED STATE A GONDOLA CAR AT DURING INTERACTION BY A ROTARY CAR DUMPER

PhD (Tech.), Associate Professor R. Viznyak

Анотація. У статті опрацьовано специфіку силових факторів, а саме експлуатаційних навантажень, що впливають на міцність кузовів піввагонів при їх вивантаженні на стаціонарних роторних вагоноперекидачах, проаналізовано можливі характерні пошкодження і несправності при цьому. Побудовано скінчено-елементні моделі конструкції і виконано оцінювання параметрів напружено-деформованого стану. Надано рекомендації щодо модернізації шляхом проєктування та зміцнення тих конструкційних зон кузова, що схильні до екстремального впливу експлуатаційних навантажень за розрахунковим режимом, обумовленим використанням розвантаження на вагоноперекидачах.

Ключові слова: піввагон, вивантаження, насипний (навалювальний) вантаж, специфіка експлуатаційних навантажень, збереження, пошкодження несучої конструкції, напружено-деформований стан, міцність, удосконалення конструкції кузова.

Abstract. In the article the specifics of force factors namely operating loads influencing durability of bodies of gondola cars at their unloading on stationary rotary car tippers are processed, possible characteristic damages and malfunctions at the same time are analyzed. Finite-element models of the structure are constructed and the stress-strain state is estimated. Recommendations for modernization by designing and strengthening those structural areas of the body that are subject to extreme exposure to operating loads, according to the design regime, which is due to the use of unloading on a car dumpers. Unloading of gondola cars in the method of overturning was introduced at industrial enterprises in the last century and is now successfully carried out with the help of stationary rotary wagon tippers. The task of the study of the stress-strain state of the body of the wagon, based on the features of the mutual operation of the mechanical system was solved by numerical integration of differential equations of distribution of full potential of potential energy on structural elements – applied variation methods of elasticity theory, theoretical and structural mechanics of machine-building constructions, and also resistance of materials whose basic laws are integrated into the most exact method for strength analysis. The maximum values of stresses in the structural zones of the side wall at the full cycle of overturning the body PV reach more than 800 MPa, which significantly exceeds the allowable for steel grades used in car building, and will inevitably lead to other deformations. This is especially observed at an angle of rotation of the system by 90 °, the maximum displacement is more than 60-70 mm. After careful research of technologies and technical means of unloading by the method of overturning the analysis concerning force influence of working bodies of car tippers on the basic elements of a bearing design of a body was carried out. The obtained results allowed to conclude that strengthening and adaptation of the body

structure to the real conditions of unloading will directly reduce the number of damages and operational malfunctions, so these measures should primarily be taken in the design, development and construction of new generation gondola bodies unloading by rotary car dumpers or wagon tippers.

Keywords: *gondola car, unloading, bulk cargo, specifics of operational loads, storage, damage to the load-bearing structure, stressed and deformed state strength, improvement of the body structure.*

Вступ. Як відомо, розвантаження вагонів-гондол, тобто сучасних піввагонів (ПВ), перекиданням було введено на промислових підприємствах ще в минулому столітті і на сьогодні вкрай успішно здійснюється за допомогою сучасних стаціонарних роторних вагоноперекидачів (СРВП). Однак слід зазначити, що під час вивантаження насипних і навалювальних вантажів основні вузли та конструкційні елементи ПВ майже завжди зазнають надмірних навантажень, що у фінальній фазі призводить до перевищення межі пружності матеріалів виготовлення і, як наслідок, їхніх залишкових деформацій, пошкоджень [1, 2, 5]. Тому при здійсненні відповідних досліджень необхідно саме зосередити увагу на оцінюванні динамічної завантаженості ПВ і обов'язковому уточненні та своєчасному перенормуванні припустимих величин силового впливу на конструкцію з боку робочих органів СРВП. У зв'язку з цим сформульовано завдання дослідження напружено-деформованого стану (НДС) кузова ПВ і уточнення параметрів його міцності, а отже, збереження виходячи з особливостей сумісно-технічної системної роботи ПВ і СРВП, що має вирішуватися за допомогою чисельного інтегрування диференціальних рівнянь розподілення повного функціонала потенційної енергії за елементами конструкції – прикладними варіаційними методами теорії пружності, класичної і будівельної механіки машинобудівних конструкцій, а також опору матеріалів. Основні закони цих методів інтегровані в сучасний і найбільш точний метод для аналізу міцності – метод скінченних елементів (МСЕ), прикладне застосування

якого дало змогу отримати уточнені теоретичні результати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо, усі типи СРВП працюють за принципом обертання вагона навколо горизонтальної осі свого центра тяжіння, тому навантаження, що діють на кузови ПВ, прогнозують і визначають його НДС, можуть ураховуватися за деякими наближеннями як ідентичні типові. За досить тривалий час сумісної роботи цих технічних засобів можуть бути згадані види експлуатаційних навантажень [3, 4, 6]. З метою проведення досліджень з уточненого аналізу НДС та оцінювання міцності елементів несучої конструкції кузовів суцільнометалевих ПВ класично здійснюється їхній натурний огляд у встановленій вибірці, фіксуються локальні місця розповсюдження остатніх деформацій і систематизуються статистичні дані щодо характерних пошкоджень саме за ознаками при здійсненні розвантажувальних операцій на СРВП. Переважно приділяється увага характерним несправностям і пошкодженням при виконанні вивантаження існуючими вагоноперекидачами роторного типу за опрацьованою класифікацією. При цьому обов'язково уточнюється співвідношення найбільш поширених причин появи пошкоджень і рецидивів наслідків у вигляді остатніх деформацій різного характеру їхніх конструкційних елементів, що раптом сигналізує про технологічне недотримання (порушення) умов затверджених і чинних ДСТУ і ГОСТів [5-7], що регламентують силові нормативи для якісного використання засобів механізації відносно вагона. Найбільшу увагу питанню аналізу НДС відкритих

вагонів, тобто без надбудови у вигляді даху, і подальшого оцінювання міцності при перекиданні за останній час приділено в роботах [10, 13-15].

Визначення мети та завдання дослідження. Головною метою досліджень при вивантаженні ПВ на СРВП після попереднього уточнення величин діючих на нього силових факторів є подальший аналіз НДС та оцінювання міцності під час фізичного процесу ударного контакту елементів несучої конструкції ПВ з привалочною плитою СРВП. При цьому були поставлені такі завдання дослідження:

- практичне вивчення особливостей процесу взаємодії ПВ з робочими органами СРВП;
- побудова скінчено-елементної моделі (СЕМ) кузова ПВ, що має «глухондну» конструкцію, призначеного для розвантаження на СРВП, на відміну від універсальних, що устатковані стандартними кришками розвантажувальних люків у підлозі та розвантажуються у гравітаційний спосіб, тобто під дією власної ваги насипних і навалювальних вантажів (НВ);
- остаточне визначення несприятливих сполучень груп навантажень, що діють на кузови ПВ при розвантаженні, і реальних зон їх прикладення під час взаємодії з СРВП на промислових об'єктах;
- аналіз НДС та оцінювання міцності кузова ПВ.

Основна частина дослідження. СЕМ кузова ПВ створювалася з набору окремих підконструкцій, поєднаних у єдиний ансамбль (рис. 1). Модель була складена з 16677 вузлів і 28412 скінченних елементів (СЕ), оптимальна кількість яких урахувалась і обиралась вбудованими можливостями програмного комплексу. При побудові СЕМ кузова ПВ були використані об'ємні (тетраедральної форми) СЕ і елементи типу «оболонка», що адекватно описують геометрію конструкції складових ПВ, чого було достатньо для вибору аналітичних функцій для апроксимації геометрії і описання

складових кузова при дослідженні експлуатаційних динамічних умов [11-14]. Такий підхід дає змогу проводити незалежну підготовку і налаштування вихідних даних для кожної підконструкції за блочно-модульним принципом, а вже потім здійснювати складання загальної системи кузова і вирішувати завдання завантаженості. Використаний при цьому програмний комплекс **ProENGINEER** є відомим і розповсюдженим комплексом САПР компанії **PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (PTC, USA)**, а саме його додаток **Pro/MECHANICA Structure**. Він дає змогу точно визначити масу кузова досліджуваного ПВ, що автоматично враховувалося при розрахунку машинобудівної конструкції на міцність і визначенні відповідних критеріїв для аналізу НДС і оцінювання міцності. Сформульовані розрахункові завдання були реалізовані сумісно зі спеціалістами відділу розрахунків на міцність ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод».

При розрахунках кузова ПВ були прийняті такі припущення, або обмеження (граничні умови при побудові розрахункової моделі):

- матеріал конструкції (низьколегована сталь марок 09Г2Д, 10ХСНД) працює у стадії пружних деформацій і має постійні характеристики: модуль Юнга (пружності) $E = 2,1 \times 10^5$ МПа і коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$;
- привалочна плита СРВП є абсолютно жорсткою;
- швидкість прилягання враховується коефіцієнтом динамічності K_d як для раптового прикладення сили;
- прилягання бокової стіни ПВ відбувається миттєво за всім периметром обпирання відносно привалочної плити;
- під час прилягання бокової стіни до привалочної плити не враховувалися вертикальні і горизонтальні зміщення кузова відносно СРВОП (нехтували прогинами ресорного підвішування ходових

частин (візків), тобто пружини ресорного комплекту приймалися як жорсткі опори);

- зазори і прогини армувальної гуми привалочної плити вважалися рівними

нулю, тобто приймався випадок миттєвого прикладення сили, що враховується коефіцієнтом динамічності K_d .

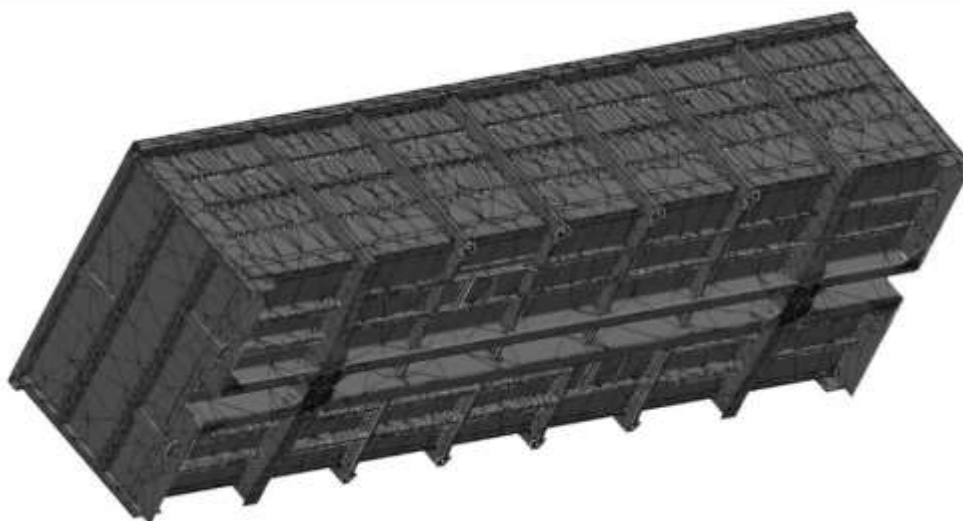


Рис. 1. Скінчено-елементна модель кузова ПВ

Положення повороту ПВ на $12,5^\circ$ наведено на рис. 2. При перекиданні платформа СРВП зміщується під дією власної ваги в напрямку прилягання бокової стіни ПВ до привалочної плити. Для запобігання сходу ПВ з рейок при повертанні платформи перекидача її конструкція передбачає наявність відбійного бруса. Приймається, що процес привалки бокової стіни ПВ здійснюється одночасно з приляганням візків до відбійного бруса (зазор між боковою стіною і привалочною плитою дорівнює зазору між візком і відбійним брусом). Тому при приляганні ПВ до привалочної плити складові загальної ваги кузова ПВ G_k і візків G_v розподіляються так:

- вага завантаженого кузова G_k і половина ваги візків G_v сприймається привалочною плитою;

- друга половина ваги візків G_v сприймається відбійним брусом.

Для визначення сили нормального тиску вантажу $N_{\text{дин}}$ на бокову стіну ПВ при

повороті платформи на кут $\alpha = 12,5^\circ$ було отримано таку залежність:

$$N_{\text{дин}} = K_d \cdot Q_{\text{в.куз}} \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

де K_d – коефіцієнт динаміки ударного контакту кузова ПВ з СРВП;

$Q_{\text{в.куз}}$ – зусилля, що діє на кузов ПВ, кН,

$$Q_{\text{в.куз}} = Q_v + Q_{\text{віз}}, \quad (2)$$

де Q_v – вага вантажу в кузові, кН;

$Q_{\text{віз}}$ – вага одного візка ПВ модельного ряду 18-..., кН.

Коефіцієнт динаміки визначався за формулою згідно з теорією удару і фізичних властивостей тіл, що співударяються,

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{\text{ст}}}}, \quad (3)$$

де H – відстань до поверхні співударяння, м;

$\delta_{\text{ст}}$ – прогин конструкції кузова у вільному положенні, м.

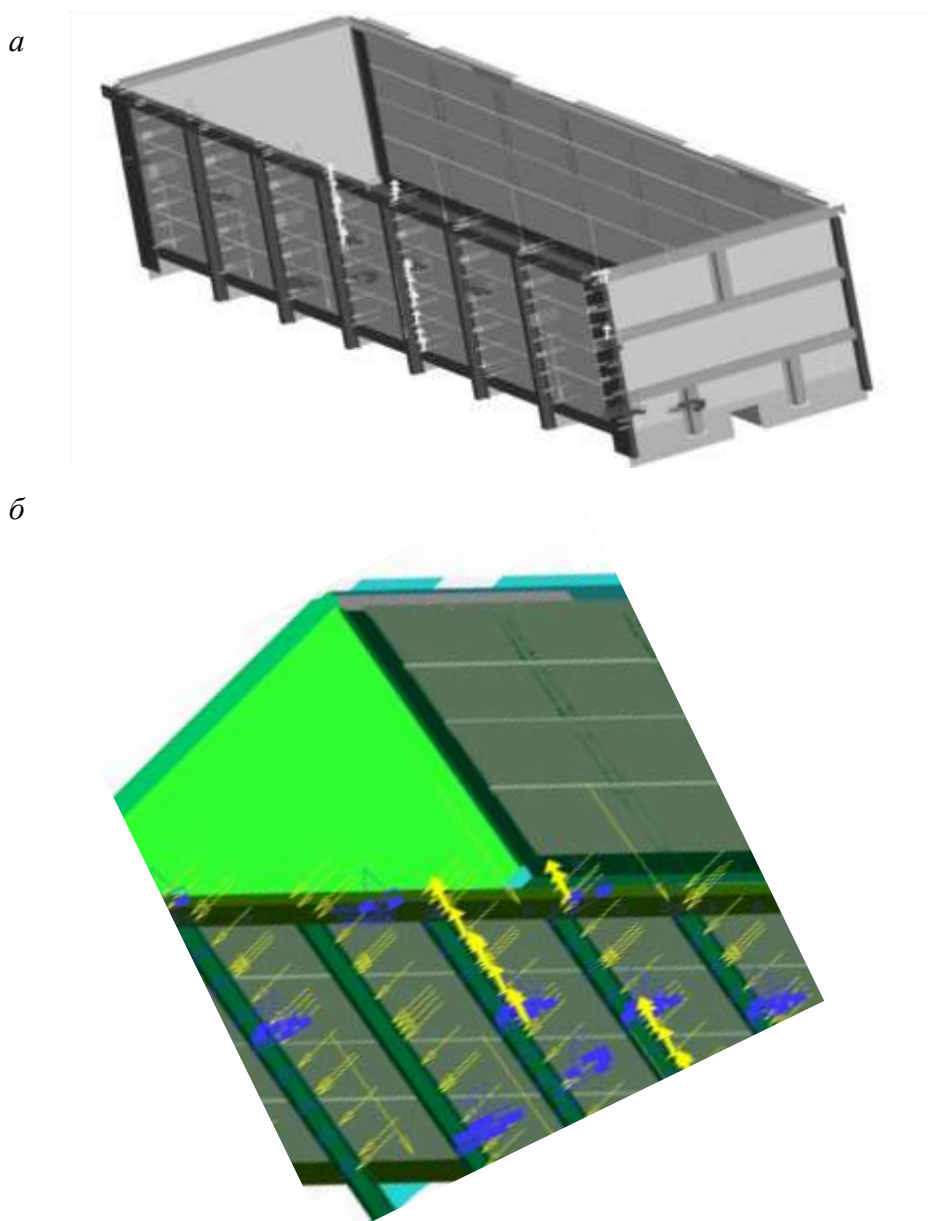


Рис. 2. Розрахункова схема кузова ПВ при повороті платформи СРВП на $12,5^\circ$ з позначенням зовнішніх сил і місць обпирання відносно конструкції СРВП: а – загальний вигляд; б – фрагмент частини кузова, вигляд зверху в масштабі 1:2

Для випадку миттєвого удару бокової стіни кузова ПВ об привалочну плиту в зоні верхнього обв'язувального пояса приймаємо $H = 0$, тоді $K_d = 2$.

Для визначення вертикальної складової P_v від ваги вантажу, що діє на підлогу ПВ при повороті платформи СРВП на кут $12,5^\circ$, використовуємо вираз

$$P_v = Q_v \cdot \cos \alpha. \quad (4)$$

Вага металоконструкції кузова $Q_{\text{куз}} = 127,53 \text{ кН}$ (13 т) урахувалась автоматично програмним засобом з моделюванням повороту кузова на $12,5^\circ$. На рис. 2 наведена розрахункова схема кузова ПВ при повороті платформи СРВП на $12,5^\circ$ з розподіленням експлуатаційних навантажень поміж його конструкційними елементами.

Обпирання кузова ПВ на візок подано в розрахунковій схемі введенням відносно п'ятника і ковзунів відповідних кінематичних закріплень. Обпирання бокової стіни на привалочну плиту СРВП моделюється також встановленням жорстких закріплень.

Такі самі розрахункові схеми було складено для основних силових положень процесу перекидання з розвантаженням: поворот кузова на 56° , 90° і 180° . Для моделювання розрахункової схеми обпирання кузова ПВ на візки були введені обмеження на переміщення відносно п'ятників і ковзунів шворневої балки рами відповідними кінематичними

закріпленнями. Обпирання бокової стіни на привалочну плиту СРВП теж моделювалось відповідними жорсткими закріпленнями.

Після процедури введення вихідної інформації складалась система лінійних рівнянь, невідомими якої є сукупність переміщень і кутів повороту вузлових точок СЕМ кузова ПВ. Матриці жорсткості кожного СЕ складались у локальній системі координат (ЛСК), що потім об'єднувались у глобальну матрицю жорсткості (ГМЖ) конструкції кузова ПВ.

Результати розрахунку глухонного кузова ПВ на міцність при повороті в СРВП на кут $12,5^\circ$ під час вивантаження наведено на рис. 3 та 4.

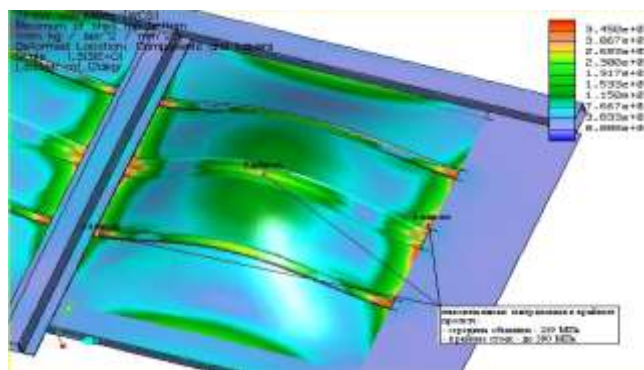
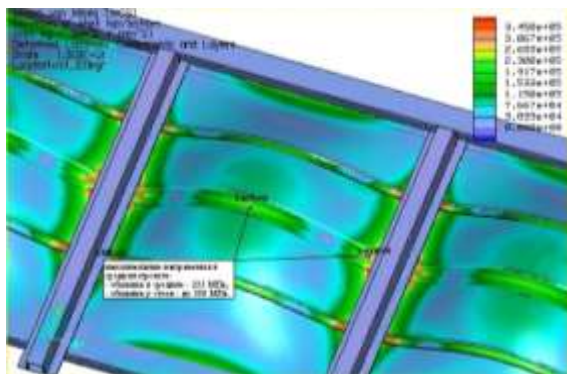


Рис. 3. Максимальні еквівалентні напруження (кПа), що виникають у середньому і кінцевому прогонах бокової стіни ПВ при повороті кузова на кут $12,5^\circ$

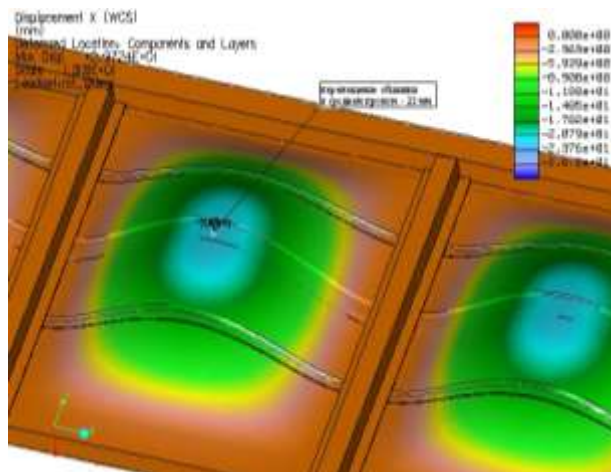
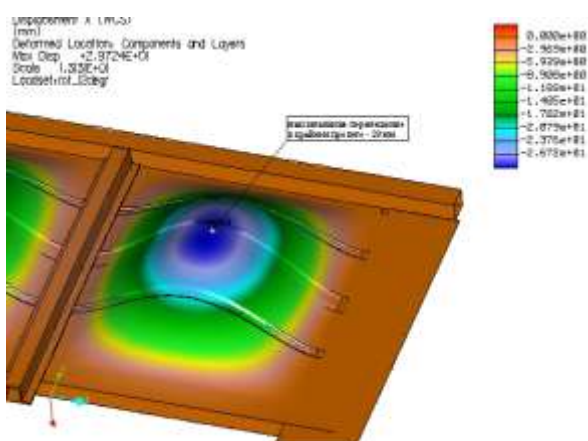


Рис. 4. Максимальні переміщення (мм), що виникають у середньому і кінцевому прогонах бокової стіни ПВ при повороті кузова на кут $12,5^\circ$

Як видно з результатів досліджень НДС кузова ПВ, що відтворені протоколами багаторазових розрахунків на рис. 3 та 4, величини максимальних еквівалентних напружень (за *теорією* енергії формозміни *von Mises-Hencky*, або за четвертою теорією міцності) спостерігаються в місцях з'єднання обшивки бокової стіни зі

стійками, а також у середній частині листів обшивки кузова, відповідно кінцевих і середніх секцій кузова ПВ. Для аналізу отриманих результатів були опрацьовані графічні залежності, зображені на рис. 5, 6, тобто відображено залежність величин напружень і переміщень від кута повороту системи СРВП-ПВ-НВ.

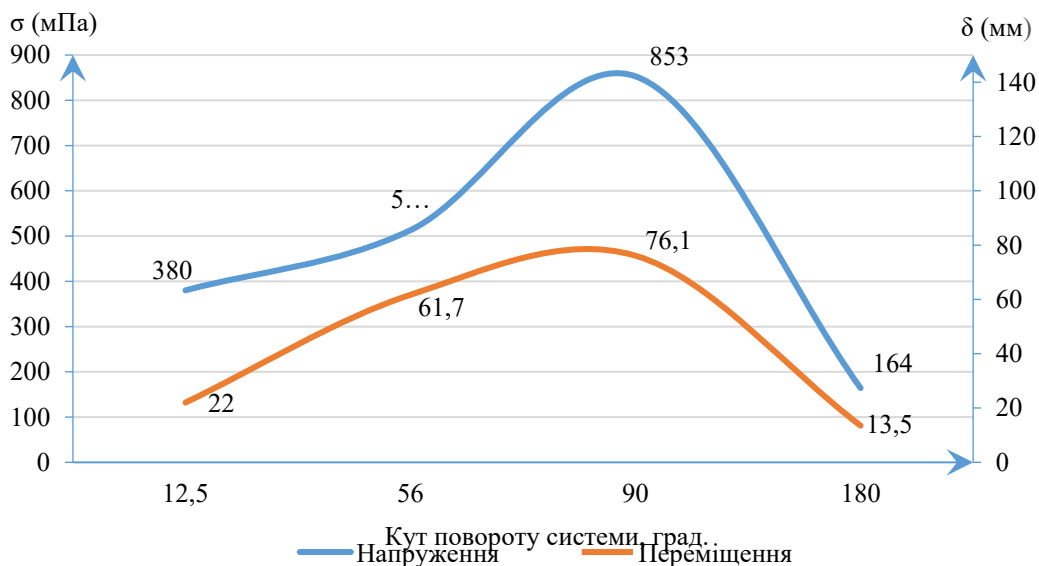


Рис. 5. Максимальні еквівалентні напруження і переміщення в середньому прогоні бокової стіни кузова ПВ

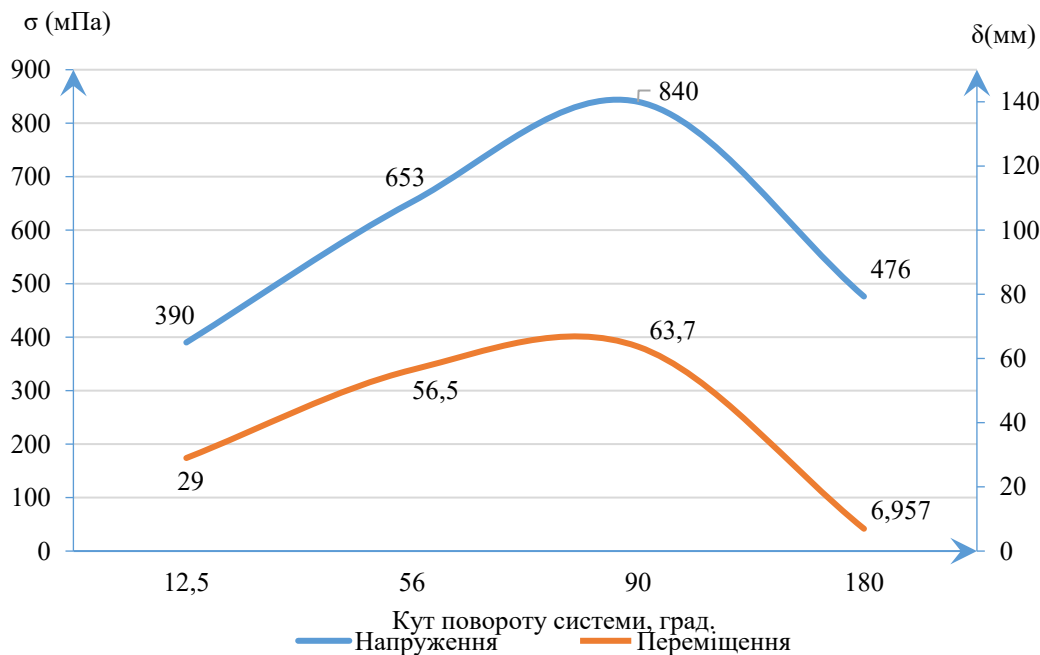


Рис. 6. Максимальні еквівалентні напруження і переміщення в кінцевому прогоні бокової стіни кузова ПВ

Висновки. При дослідженнях були реалізовані поставлені завдання і отримані такі результати:

- уточнено особливості фізичної взаємодії конструкційних зон ПВ при контакті з робочими органами СРВП, визначено основні кути завантаженості при перекиданні, тобто 12,5°, 57°, 90°, 180°. Опрацьовано відповідні розрахункові схеми;

- побудовано скінчено-елементну модель (СЕМ) кузова ПВ, що має «глухондону» конструкцію і призначений для розвантаження на СРВП, з метою проведення розрахунків його міцності;

- визначено несприятливі сполучення груп навантажень, що водночас діють на кузов ПВ при розвантаженні, і реальних зон їх прикладення при взаємодії з СРВП;

- проведено аналіз НДС кузова ПВ і визначено його головні параметри. Як видно, максимальні величини еквівалентних напружень у конструкційних зонах бокової стіни при повному циклі перекидання кузова ПВ складають більше 800 МПа, що

значно перевищує припустимі 275-295 МПа для марок сталей, застосовуваних у вагонобудуванні [1, 2], і неминуче призводить до виникнення остатніх деформацій у конструкції. Це особливо спостерігається при куті повороту системи на 90°, максимальні величини переміщень при цьому складають більше 60-70 мм;

- для підтвердження вірогідності отриманих теоретичних розрахунків слід проводити обов'язкову процедуру з *верифікації та валідації під час запланованих натурних випробувань.*

Отримані рекомендації зі зміцнення і адаптації конструкції кузова ПВ до реальних умов розвантаження на СРВП безпосередньо впливатимуть на зменшення кількості пошкоджень і експлуатаційних несправностей, тому ці заходи першочергово мають бути покладені в основу на стадії проектування, розроблення і побудови конструкцій кузовів ПВ нових поколінь, призначених для продуктивного вивантаження на вагоноперекидачах [8, 9, 16].

Список використаних джерел

1. ГОСТ 33211: 2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Чинний від 2011-05-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121493> (дата звернення: 20.05.2021).
2. ДСТУ 7598: 2014. Вагоны вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Чинний від 2014-12-02. URL: <http://uas.org.ua> (дата звернення: 21.05.2021).
3. Сохранность вагонов при разгрузке на вагоноопрокидывателях / Г. К. Сендеров, П. Р. Лосев, Р. В. Мартынов, Ю. О. Файерштейн. *Ж.-д. трансп. Сер. Вагоны и вагонное хозяйство*. Москва: ОИ / ЦНИИТЭИ МПС. 1978. Вып. 3. С. 1–8.
4. Носырев Д. Я., Коркина С. В. Уточнение динамических составляющих в расчетных схемах при разгрузке кузова полувагона на вагоноопрокидывателе. *Наука и образование транспорта*. Самара: Самарский ун-т путей сообщения, 2018. Вып. 1. С. 53-58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37072667> (дата звернення: 21.05.2021).
5. ДСТУ/ГОСТ:22235-76/2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. Чинний від 2010-11-12. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200082560> (дата звернення: 21.05.2021).
6. Изменения и дополнения к межгосударственному стандарту (ГОСТ: 22235-76) по сохранности грузовых вагонов / Г. К. Сендеров, А. П. Ступин, С. А. Другаль, Е. А. Поздина. *Ж.-д. трансп. Сер. Вагоны и вагонное хозяйство*. Москва: ЭИ/ ЦНИИТЭИ МПС, 1999. Вып. 3. С. 1–32.
7. Чепурченко И. В. Совершенствование конструкции кузова полувагона путем выбора рациональных параметров нагруженных элементов: автореф. дис. ... канд. тех наук. Омск:

ОМГУПС, 2019. 20 с. URL: https://www.omgups.ru/science/diss/soiskateli/chepurchenko-ilya-vadimovich/ref_chepurchenko.pdf (дата звернення: 21.05.2021).

8. Вагоноперекидач: пат. 38112 Україна, МПК⁷ B65G67 / 48 / Головки В. Ф., Венцель Є. С., Деркач І. А., Візняк Р. І. (Україна); УкрДАЗТ. № 1771-III. Заявл. 30.05.2000, Опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12. 8 с. URL: <https://uapatents.com/patents/viznyak-ruslan-ivanovich> (last access: 28.10.2021).

9. Візняк Р. І. Уточненная модель прочности кузова полувагона нового поколения при разгрузке на вагоноопрокидывателе. *Безопасность движения поездов. Тезисы докл. науч.-практ. конф. РУТ (МИИТ)*. Москва, 2015. С. 25. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-konstruktsii-kuzova-poluvagona-putem-vybora-ratsionalnykh-parametrov-nagr> (last access: 28.10.2021).

10. Petrov G. I., Panachev I. Adaptation of mathematical model to the conditions of unloading of the gondola car body by means of tipping. *Transport business of Russia*. 2017. № 1 (128). P. 138–143. URL: https://mnv.irgups.ru/sites/default/files/articles_pdf_files (last access: 21.05.2021).

11. Ansari M., Esmailzadeh E., Younesian D. Longitudinal dynamics of freight trains. *International journal of heavy vehicle systems*. 2009. № 16 (1-2). P. 102–131. URL: <https://trid.trb.org/view/889648> (last access: 21.05.2021).

12. Huang Z., Tong H., Fan Y. The longitudinal dynamics of heavy-haul trains in the asynchronous brake control system. *Electrical and Electronics Engineers*. 2010. № 3. P. 900–903. URL: <https://journals.vgtu.lt/index.php/Transport/article/view/11509> (last access: 21.05.2021).

13. Dodonov A. V., Hilov I. A., Bityuk A. A. Improvement of the method of calculating the strength of the gondola body structure of the gondola during unloading on the wagon breaker. *Engineering center of car building*. St. Petersburg. 11 (2012). URL: https://www.researchgate.net/publication/336582140_Investigation_of_possibility_of_hopper_cars_unloading_on_the_car_dumper_VRS-134M (last access: 26.10.2021).

14. Investigation of possibility of hopper cars unloading on the car dumper VRS–134M / Stepan Dovhaniuk, Volodymyr Kalashnyk, Alexei Reidemeister and Oleksandr Shykunov; Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 49000 Dnipro, Ukraine MATEC Web of Conferences 294, 06003 (2019). URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929406003> (last access: 26.10.2021).

15. Lindsay James Dobson. Dumper derailment investigation and development of custom check rail University of Southern Queensland. Faculty of Health, Engineering and Sciences. A dissertation submitted by in fulfilment of the requirements of ENG4111 and 4112 Research Project towards the degree of Bachelor of Engineering (Honors) (Mechanical). October, 2016. P. 49. URL: https://eprints.usq.edu.au/31395/1/Dobson_L-Goh%20.pdf; <https://www.semanticscholar.org/paper/Dumper-derailment-investigation-and-development-of-Dobson/a5e6553b64d69fa231c194608068a991c908ed05> (last access: 26.10.2021).

16. Візняк Р. І. Дослідження особливостей взаємодії рухомого складу з технічними засобами вантажно-розвантажувальних робіт у залізнично-водному сполученні: Грант Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених / Дог. № JP/F11/0070 від 21.01.06 р.; № держ. р. 0106U004123. Харків: УкрДАЗТ, 2006. 144 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1279/2005> (дата звернення: 29.10.2021).

Візняк Руслан Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. Тел.: (057)7301035, +380502308245. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Viznyak Ruslan PhD (Tech). Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-6179-4981. Тел.: (057)7301035, +380502308245. E-mail: viznyakruslan@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 17.05.2023 р.

УДК 629.42

ВИБІР ВАРІАНТІВ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКОМОТИВІВ З УРАХУВАННЯМ ОПТИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, канд. техн. наук О. О. Шапатіна,
аспіранти Залата А. С., Д. О. Мацегора, О. В. Лагерева, магістрант М. В. Васильєв

CHOICE OF OPTIONS OF LOCOMOTIVE CHARACTERISTICS TAKING INTO ACCOUNT OPTIMUM EFFICIENCY

D. Sc. (Tech.) O. S. Krashenin, PhD (Tech.) O. O. Shapatina, postgraduate students
A. Zalata, D. O. Matsegora, O. V. Lagereva, master's student M. V. Vasiliev

Анотація. Насиченість локомотивного парку залізниць різними серіями локомотивів не завжди відповідає їхньому ефективному використанню при закладених у них особливих характеристиках.

У статті розглянуто процедуру формування вимог до характеристик локомотивів на основі критерію ефективності.

При перевірці умов відповідних заміщень для безрозмірних шкал часткових показників локомотивів визначено ефективну множину деяких рішень, на підставі якої формується оптимальне рішення з вибору характеристик локомотивів для конкретних умов використання.

На підставі конкретних даних показана процедура з прийняття рішень щодо деяких характеристик локомотивів.

Ключові слова: безрозмірна шкала, функція ефективності, метод заміщення, експерт, експлуатація локомотивів, експлуатаційні параметри, паливна економічність.

Abstract. The saturation of the locomotive park of railways with various series of locomotives does not always correspond to their effective use given their inherent special characteristics.

Modern conditions require all participants in design, construction, operation and repair to make correct and well-founded decisions. The variety of series of locomotives, which provide different requirements of economic activity, is not always the basis of their effective operation. This especially applies to locomotives that are purchased abroad.

As the experience of their operation has shown, they are not always adapted to the real conditions of operation in our country. This is, first of all, their intensive exploitation and the lack of adaptability of the repair base to maintenance and repair of rolling stock.

On the other hand, the capacity range, for example, of the freight locomotives that were purchased, does not correspond to the traditional ones, which take into account both the length of the warehouse and the length of the receiving-departing routes, etc.

In our country, sufficient experience has been accumulated and there were appropriate conditions for a comprehensive coverage of the tasks of both design and construction of locomotives for the provision of industrial enterprises in freight transportation, as well as the population in intercity and suburban transportation.

Unfortunately, there are many factors that currently make even the minimal needs for updating both the locomotive fleet and the modernization of the operational and repair activities of railway enterprises impossible. In these conditions, perhaps the most important task is the correct, justified choice of locomotive characteristics, taking into account its technical condition.

The article deals with the procedure of forming requirements for the characteristics of locomotives based on the efficiency criterion.

Based on the verification of the conditions of the corresponding substitutions for the dimensionless scales of the pure indicators of the locomotives, an effective set of some solutions is determined, on the basis of which the optimal solution is formed for the selection of locomotive characteristics for specific conditions of use.

Based on specific data shown decision-making procedures regarding some characteristics of locomotives.

Keywords: *dimensionless scales, efficiency function, substitution method, expert.*

Вступ. Сучасні умови потребують від усіх учасників, хто забезпечують проєктування, будівництво, експлуатацію і ремонт, прийняття правильних і обґрунтованих рішень.

Різноманітність серій локомотивів, що забезпечують різні вимоги господарської діяльності, не завжди є основою їхньої ефективної роботи. Особливо це стосується локомотивів, закуповуваних за кордоном.

Як показав досвід, вони не завжди пристосовані до реальних умов експлуатації, що склалися в нашій країні. Це насамперед інтенсивна їхня експлуатація і непристосованість ремонтної бази до проведення технічного обслуговування (ТО), поточного ремонту (ПР) рухомого складу.

З іншого боку, діапазон потужностей, наприклад вантажних локомотивів, що були закуплені, не відповідає традиційним, які враховують як довжину складу, так і довжину приймально-відправних шляхів і т. д.

У нашій країні накопичений достатній досвід і наявні відповідні умови для всебічного охоплення завдань як з проєктування, так будови локомотивів для забезпечення промислових підприємств у вантажних перевезеннях, а населення в міжміських і приміських перевезеннях.

На жаль, є багато факторів, що зараз унеможливають навіть мінімальні потреби як в оновленні локомотивного парку, так і осучасненні експлуатаційної та ремонтної діяльності господарств залізниць.

За цих умов чи не найголовнішим завданням є правильний, обґрунтований вибір характеристик локомотивів з урахуванням його технічного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За роки незалежності на рівні держави і галузі було прийнято багато управлінських і стратегічних рішень, направлених на відродження і розвиток галузі [1-3]. Ці заходи дали деякий імпульс розвитку залізничної галузі, але темпи їхнього запровадження та інерційність управлінської системи не дали змогу повною мірою реалізувати намічені цілі.

Багато в чому цьому сприяла недовіра і неврахування науково-дослідних розробок, що ігнорувались практикою.

Разом з тим фундаментальні та інженерні дослідження суттєво могли б дати імпульс розвитку галузі.

Так, у роботах [4-8] розглянуто теоретичні і практичні питання ефективності врахування в системі показників роботи транспорту принципів життєвого циклу.

А в роботах [9-12] розглядаються тенденції, що треба враховувати при виготовленні, технічному обслуговуванні та ремонті рухомого складу.

Значну кількість публікацій присвячено проблемам модернізації тягового рухомого складу [13-15], у яких сформульовано питання вибору і принципи оцінювання ефективності модернізації.

Слід зазначити, що наукові підходи, які розглядаються в інших дослідженнях [16-18], переважно залежать від зваженості і правильності прийняття практичних рішень.

Урахування цих факторів обумовлює актуальність питань, що розглядаються в статті.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження полягає в розробленні методики вибору варіантів характеристик локомотивів з урахуванням досягнення їхньої оптимальної ефективності.

У такій постановці були сформульовані етапи реалізації поставленої мети:

1. Вибрати множину оцінок, що характеризують ефективність прийнятого рішення.

2. Оцінити часткові відносні показники неоднорідної природи, які характеризують властивості локомотива.

3. Використовуючи спеціальні алгоритми, визначити значення функції ефективності.

Основна частина дослідження. За умови, коли оцінювані об'єкти або їхні характеристики суб'єктивні і отримати необхідні дані щодо них шляхом об'єктивних вимірювань неможливо (наприклад за допомогою вимірювальних пристроїв, що діють на основі фізичних законів), для прийняття рішень необхідно використовувати методи експертного оцінювання [18, 19].

Особливо це стосується питань, пов'язаних з проєктуванням або модернізацією локомотивів.

У цьому випадку за оцінками експертів (ЕК), отриманими за результатами контрольних подань множини елементів, апроксимують деяку числову функцію, яка кожному елементу (характеристиці) оцінювання $d \in D$ ставить у відповідність деяке число, величина якого виявляє перевагу певного елемента (з досягненням мети дії, умови проведення, витратами і т. д.). Таку функцію називають функцією ефективності.

При використанні цієї функції задають попередні елементи і орієнтовні коефіцієнти важливості γ_i .

Розв'язується оптимізаційна задача і визначається розв'язок u^* . ЕК аналізує отримані значення показника функції

ефективності $W_i(u^*)$ і за необхідності корегує коефіцієнти важливості або обирає інший вид функції.

При виборі можливих варіантів сполучення характеристик локомотивів обираємо функцію ефективності $W_e(x(e))$, що упорядковує за призначенням будь-які векторні оцінки [19]:

$$x, y \in X : x \geq y \Rightarrow W_e(x) \geq W_e(y). \quad (1)$$

Задачу вибору оптимального розв'язку можна звести до такої оптимізаційної задачі:

$$u : \max_{u \in U} W_e(x(u)). \quad (2)$$

У більшості випадків використовують адитивну форму функцій ефективності

$$W_e(x) = \sum_{i=1}^m f_i(x_i), \quad (3)$$

де x_i – оцінка i -ї компоненти векторного показника ефективності;

$f_i(x_i)$ – часткова функція ефективності за i -ю компонентою векторного показника.

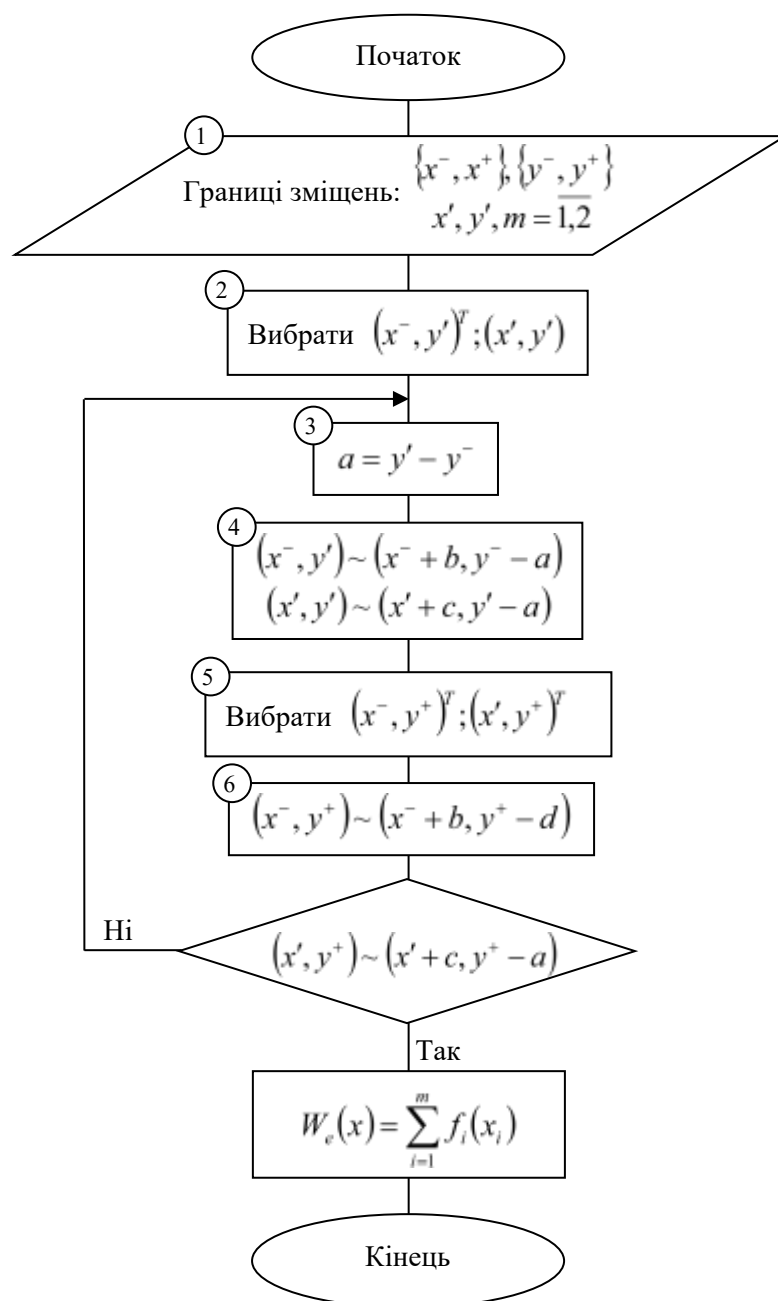
Для двовірної задачі ($m = 2$) необхідно виконати умови відповідних заміщень.

Структурна схема алгоритму заміщень наведена на рис. 1.

Розглянемо реалізацію цього алгоритму при прийнятті рішення щодо вибору діапазону двох характеристик проєктованого локомотива.

Будемо його характеризувати такими показниками W з компонентами: W_1 – дальністю переміщення вантажів без екіпірування паливом, W_2 – зчіпною масою.

Визначимо функцію ефективності для прийняття рішення щодо варіанта проєкту, який можна реалізувати для конкретних умов експлуатації.

Рис. 1. Структурна схема алгоритму заміщення при $m = 2$

Оскільки часткові показники неоднорідні, то попередньо переведемо їх у єдину безрозмірну шкалу за виразом

$$W_i = \frac{W_i^0}{W_i^{PP}},$$

де W_i^0 – вихідний показник, наприклад середньостатистичний для певного проєкту локомотива;

W_i^{PP} – потрібний показник, наприклад значення найкращого зразка.

Задамося значеннями показників недовмінованого проєкту локомотива в межах

$$X = \{x_1^-, x_1^+\} \cdot \{x_2^-, x_2^+\},$$

де $x_1^- = 60, x_1^+ = 120, x_2^- = 30, x_2^+ = 100$.

За допомогою алгоритму перевіряємо виконання умови відповідності заміщення.

Розіб'ємо область значення показників на дві частини граничними точками $x_1^1 = 80, x_2^1 = 70$.

Обираємо величину $a = 20\%$ і запрошуємо експерта (ЕК) вказати, наскільки треба збільшити значення x_1 (дальність поїздки без екіпірування паливом), щоб компенсувати зменшення зчіпної маси локомотива в точці $(60, 70)^T$ (рис. 2), ЕК дає таку рекомендацію:

1. $(60, 70)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 15\% \Rightarrow (75, 50)^T$. Аналогічно для точки $(80, 70)^T$.
2. $(80, 70)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 20\% \Rightarrow (100, 50)^T$.
3. $(60, 100)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 15\% \Rightarrow (75, 80)^T$.
4. $(80, 100)^T \rightarrow (ЕК)$: при $x_2 \downarrow a = 20\% \sim x_1 \uparrow b = 20\% \Rightarrow (100, 80)^T$.

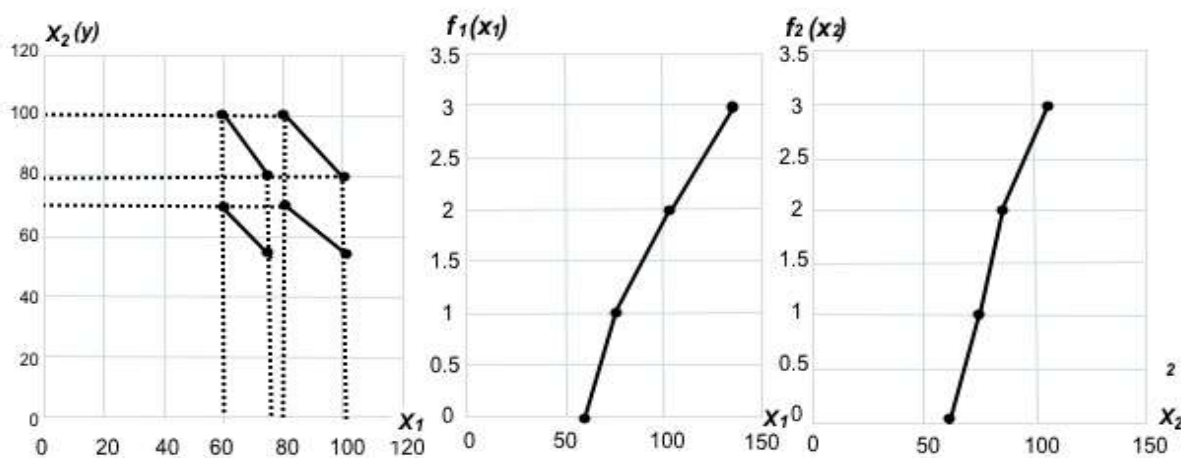


Рис. 2. Схема побудови функції ефективності

Після виконання умови відповідності переходимо до побудови функції ефективності в адаптивній формі за алгоритмом 2, структурна схема якого наведена на рис. 3.

Приймаємо $f_1(60)=f_2(30)=0$ і обираємо за порадою ЕК $a_1=15$, тоді $f_1(60+15)=f_2(75)$.

Відповідно до вимог п. 4 алгоритму 2, за порадою з ЕК, визначаємо b_2^0 з виразу

$$b_2^0 : (x_1^- = 60, x_2^- = 30, y_2^0 = 70)^T \sim (y_1^0 = 75, x_2^- = 30)^T,$$

$$ЕК : b_2^0 = 40\% \Rightarrow f_2(30 + 40) = f_2(70) = 1.$$

Згідно з п. 5 алгоритму 2, за порадою ЕК, визначаємо $b_1^{(1)}$ з виразу

$$b_1^{(1)} : (75, 70)^T \sim (75 + b_1^{(1)}, 30); ЕК : b_1^{(1)} = 30\% \Rightarrow f_1(75 + 30) = f_1(105) = 2.$$

Перевіряємо умову: $y_1^{(k)} = 105 \leq x_1^+ = 120 \Rightarrow K = 2$.

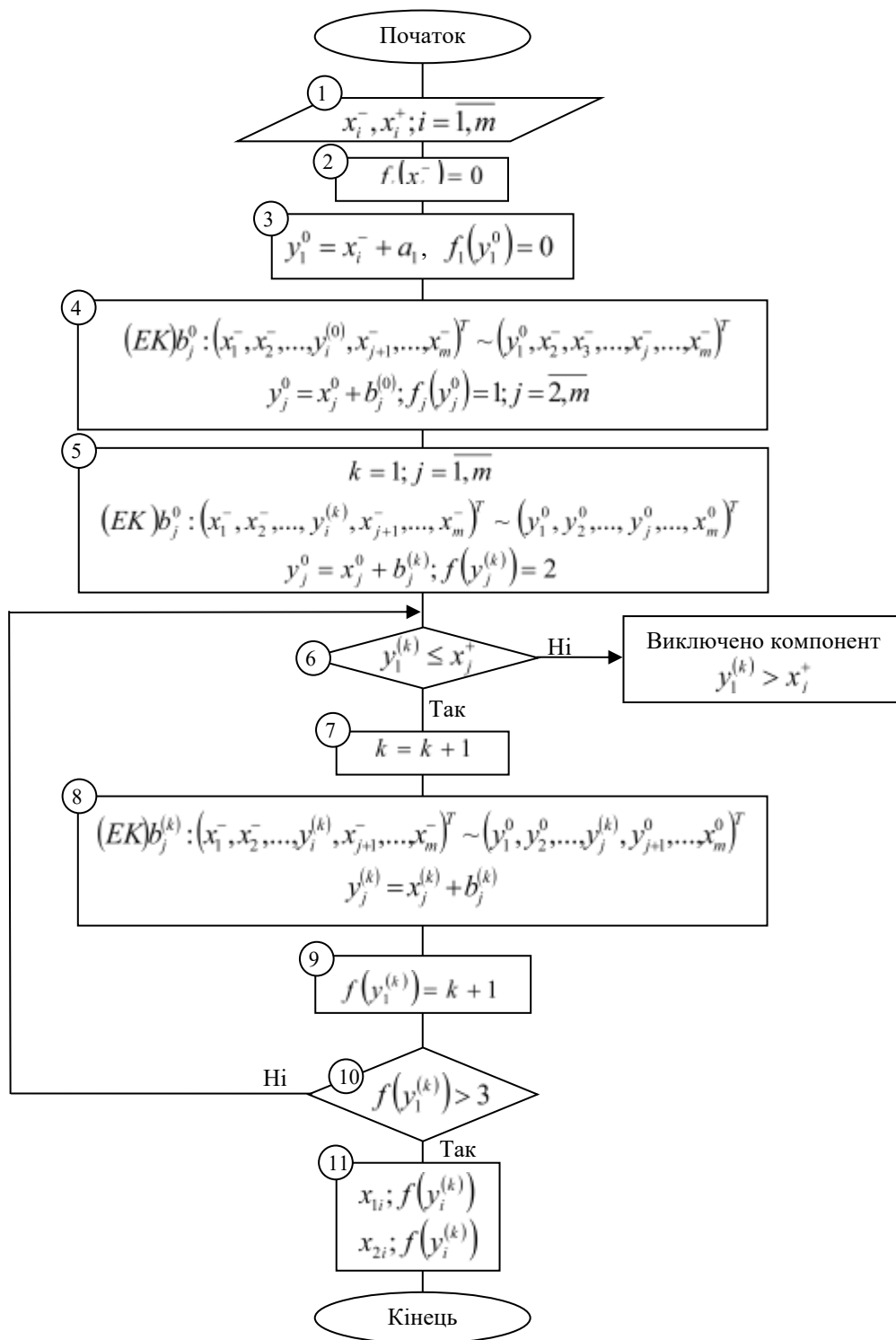


Рис. 3. Структурна схема алгоритму сумісного шкалювання

Побудовані функції ефективності дають змогу визначити оптимальні варіанти проекту з декількох альтернативних.

Так, нехай треба порівняти $W_e^1(105, 85)$ і $W_e^1(120, 70)$.

$$W_e^1 = (105, 85) = f_1(105) + f_2(85) = 2 + 2 = 4.$$

$$W_e^1 = (120, 70) = f_1(120) + f_2(70) = 2,5 + 1 = 3,5,$$

тобто кращим є перший варіант W_e^1 .

До умов попереднього прикладу введемо додатковий частковий відносний показник W_3 – економічність локомотива.

Нормовану функцію ефективності побудуємо за допомогою алгоритму 3, структурна схема якого наведена на рис. 4.

Цей алгоритм, на відміну від алгоритму 2, не має введення процедури усереднення показників u_i для пошуку часткової ефективності $f_i(y_i)$.

Реалізацію цього алгоритму розглянемо на такому прикладі.

За даними ЕК отримана інформація відносно часткових характеристик локомотивів [19]:

$$\begin{aligned} W_1 - \text{дальність перевезень} & \quad \{x_1^- = 60, x_1^+ = 110\} & x_1^1 = 80; \\ W_2 - \text{зчіпна маса локомотива} & \quad \{x_2^- = 30, x_2^+ = 100\} & x_2^1 = 70; \\ W_3 - \text{економічність локомотива} & \quad \{x_3^- = 70, x_3^+ = 130\} & x_3^1 = 100. \end{aligned}$$

Згідно з п. 2 алгоритму 3

$$f_1(x_1^- = 60) = f_2(x_2^- = 30) = f_3(x_3^- = 70) = 0;$$

$$f_1(x_1^+ = 120) = f_2(x_2^+ = 100) = f_3(x_3^+ = 130) = 1.$$

Вибираємо граничні точки $x_1^1 = 80, x_2^1 = 70, x_3^1 = 100$.

Згідно з п. 4 алгоритму 3 будуємо $f_1(x_1)$.

Прийmemo

$$\begin{aligned} y^- = 60, & \quad y^+ = 120, & y_A = 60, & \quad y_{II} = 60, & k = 1 \\ (x_1^-) & \quad (x_1^+) & (y_A = y^-) & \quad (y_{II} = y^+) \end{aligned};$$

$$y^{(1)} = y^{(k=1)} = \frac{60 + 120}{2} = 90.$$

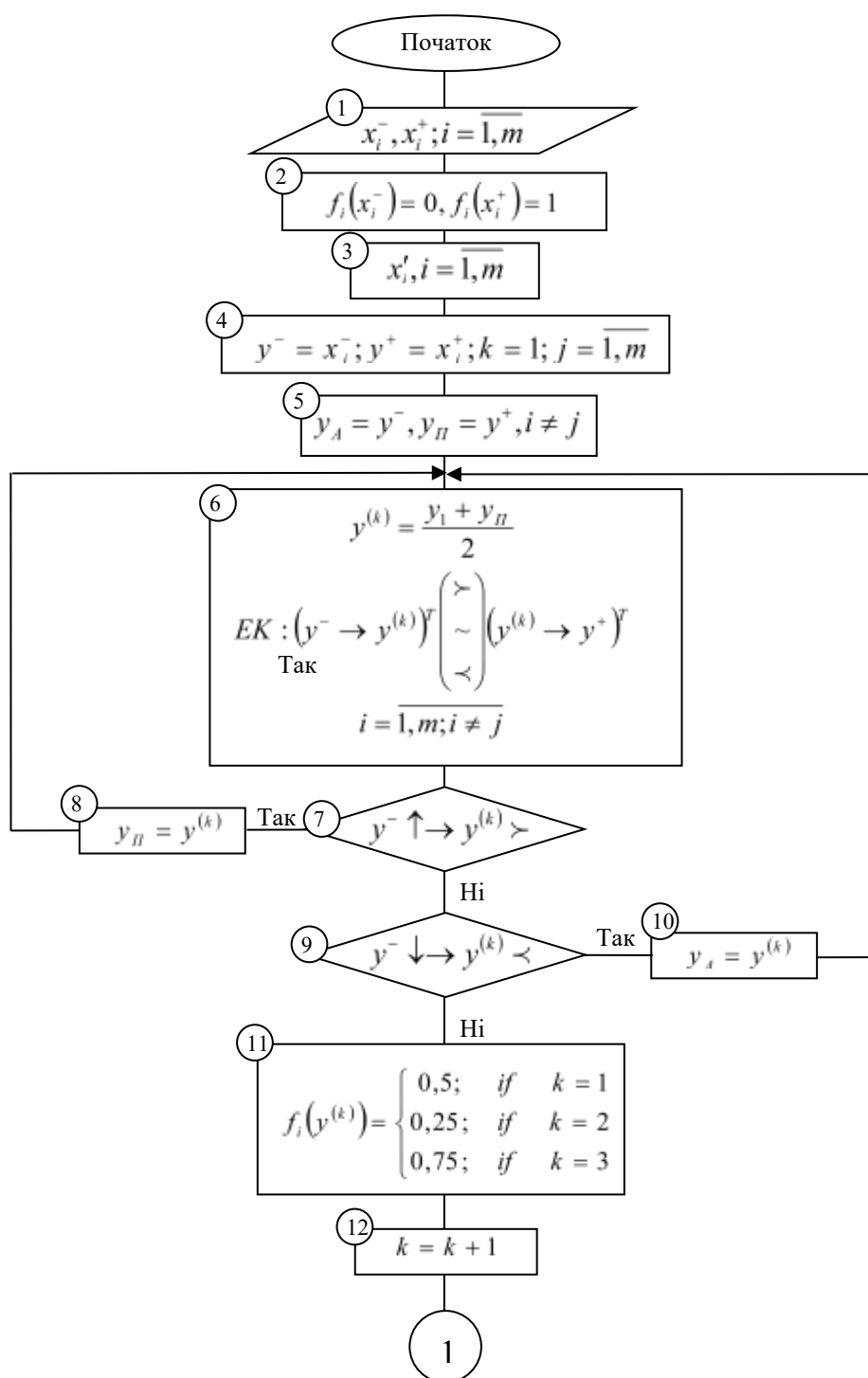


Рис. 4. Структурна схема алгоритму 3 побудови нормованої часткової ефективності (початок)

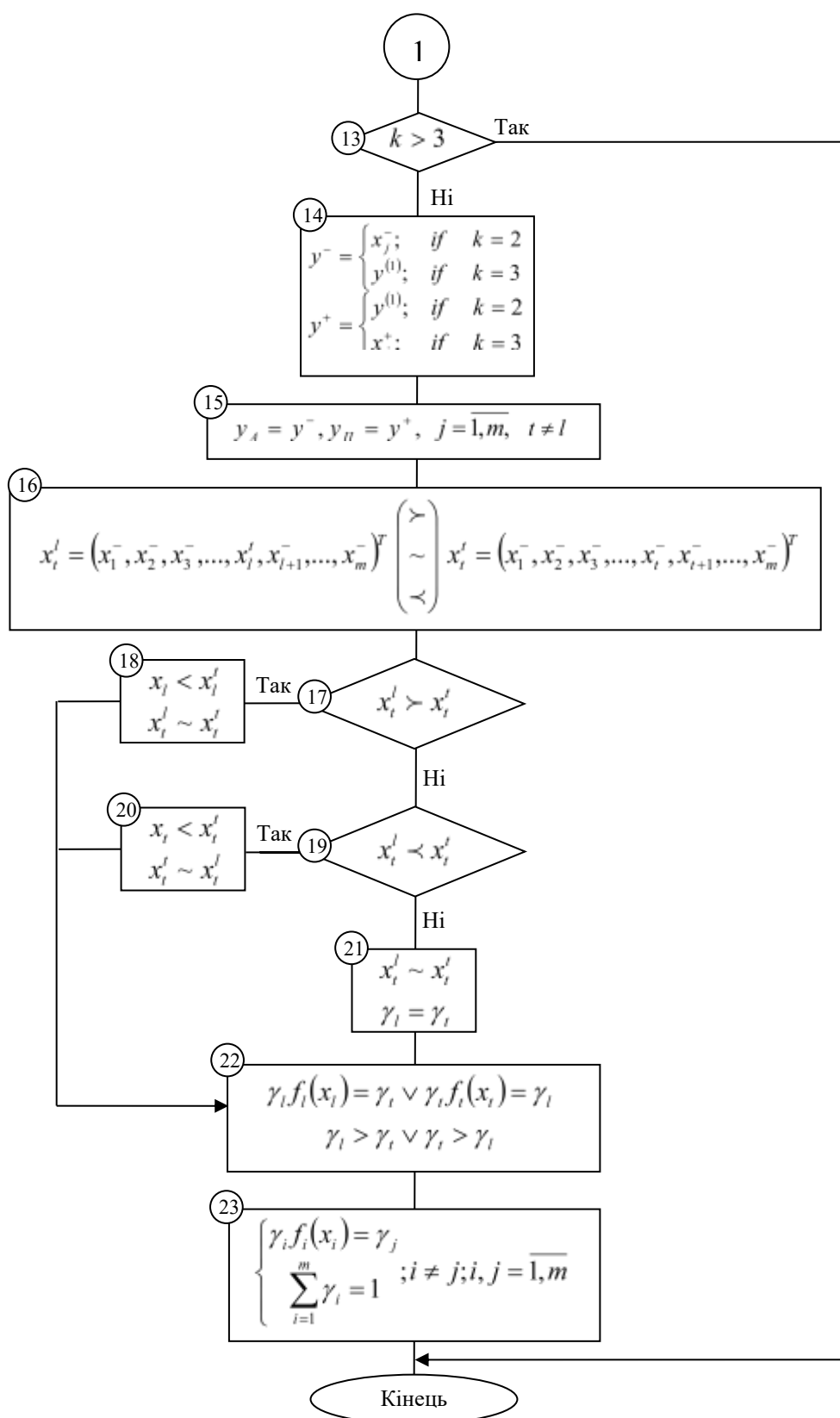


Рис. 4. Структурна схема алгоритму 3 побудови нормованої часткової ефективності (продовження)

Оскільки отримана інформація від EK $y = 60 \rightarrow y^{(1)} = 90$ переважно ($\uparrow$), то $y^{(1)} = 90 \rightarrow y^+ = 120$.

$$\text{Приймаємо } y_{II} = y^{(1)} = 90 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{60+90}{2} = 75.$$

Від EK отримана інформація $y^- = 60 \rightarrow y^{(1)} = 75$ ($\downarrow$) $y^{(1)} = 75 \rightarrow y^+ = 120$.

$$y_{II} = y^{(1)} = 75 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{75+90}{2} = 82,5 = 83.$$

Від EK отримана інформація

$$y^- = 60 \rightarrow y^{(1)} = 83 \sim 83 \rightarrow 120 \Rightarrow f_1(y^{(1)}) = f_1(83) = 0,5.$$

Тоді приймаємо $k=2$: $y^- = x_1^- = 60, y^+ = y^{(1)} = 83$ і згідно з п. 4 алгоритму 3 маємо $y_{II} = y^- = 60, y_{II} = y^+ = 83$.

А згідно з п. 6 алгоритму 3

$$y^{(2)} = \frac{y_{II} + y_{II}}{2} = \frac{60+83}{2} \approx 70, f_1(70) = 0,25.$$

Приймаємо $k=3$:

$$y^- = y^{(1)} = 83, y^+ = x_1^+ = 120 \Rightarrow y_{II} = y^-; y_{II} = y^+.$$

$$y^{(3)} = \frac{83+120}{2} \approx 105, f_1(105) = 0,75.$$

Приймаємо $j=2$: $y^- = 30, y^+ = 100, y_{II} = 30, y_{II} = 100, k=1$

$$y^{(1)} = y^{(k=1)} = \frac{30+100}{2} = 65.$$

Від EK отримана інформація

$$y^- = 30 \rightarrow y^{(1)} = 65 \quad (\succ) \quad y^{(1)} = 65 \rightarrow y^+ = 100.$$

$$y_{II} = y^{(1)} = 65 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{30+65}{2} = 47.$$

Від EK отримана інформація

$$y^- = 30 \rightarrow y^{(1)} = 47 \quad (\succ) \quad y^{(1)} = 47 \rightarrow y^+ = 100.$$

$$y_{II} = y^{(1)} = 47 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{47+100}{2} = 74 \Rightarrow f_1(y^{(1)}) = f_1(74) = 0,5.$$

Приймаємо $k=2$: $y^- = x_1^- = 30, y^+ = y^{(1)} = 74$ і згідно з п. 4 алгоритму 3 маємо $y_L = y^- = 30, y_{II} = y^+ = 74$.

Тоді

$$y^{(2)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{30 + 74}{2} = 52, \quad f_1(52) = 0,25.$$

Приймаємо $k=3$: $y^- = y^{(1)} = 74, y^+ = x_1^+ = 100 \Rightarrow y_L = y^-, y_{II} = y^+$.

Тоді

$$y^{(3)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{74 + 100}{2} = 87, \quad f_1(87) = 0,75.$$

Приймаємо $j=3$: $y^- = 70, y^+ = 130, y_L = 70, y_{II} = 130, k=1$

$$y^{(1)} = y^{(k=1)} = \frac{70+130}{2} = 100.$$

Від ЕК отримуємо інформацію

$$y^- = 70 \rightarrow y^{(1)} = 100 \quad (\prec) \quad y^{(1)} = 100 \rightarrow y^+ = 130.$$

Приймаємо $y_{II} = y^{(1)} = 100 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{100+130}{2} = 115.$

Від ЕК отримуємо інформацію $y^- = 70 \rightarrow y^{(1)} = 115 \quad (\succ) \quad y^{(1)} = 115 \rightarrow y^+ = 130.$

Тоді

$$y_{II} = y^{(1)} = 115 \Rightarrow y^{(1)} = \frac{70+115}{2} = 93 \Rightarrow f_1(y^{(1)}) = f_1(93) = 0,5.$$

Приймаємо $k=2$: $y^- = x_1^- = 70, y^+ = y^{(1)} = 93$ і згідно з п. 4 алгоритму 3 $y_L = y^- = 70, y_{II} = y^+ = 93.$

Розрахуємо $y^{(2)} = \frac{y_L + y_{II}}{2} = \frac{70 + 93}{2} = 82.$

Приймаємо $k=3$: $y^- = y^{(1)} = 93, y^+ = x_1^+ = 130 \Rightarrow y_L = y^-, y_{II} = y^+.$

Тоді

$$y^{(3)} = \frac{93+130}{2} = 111, \quad f_1(111) = 0,75.$$

За отриманими даними будемо функцію ефективності методом половинного ділення (рис. 5).

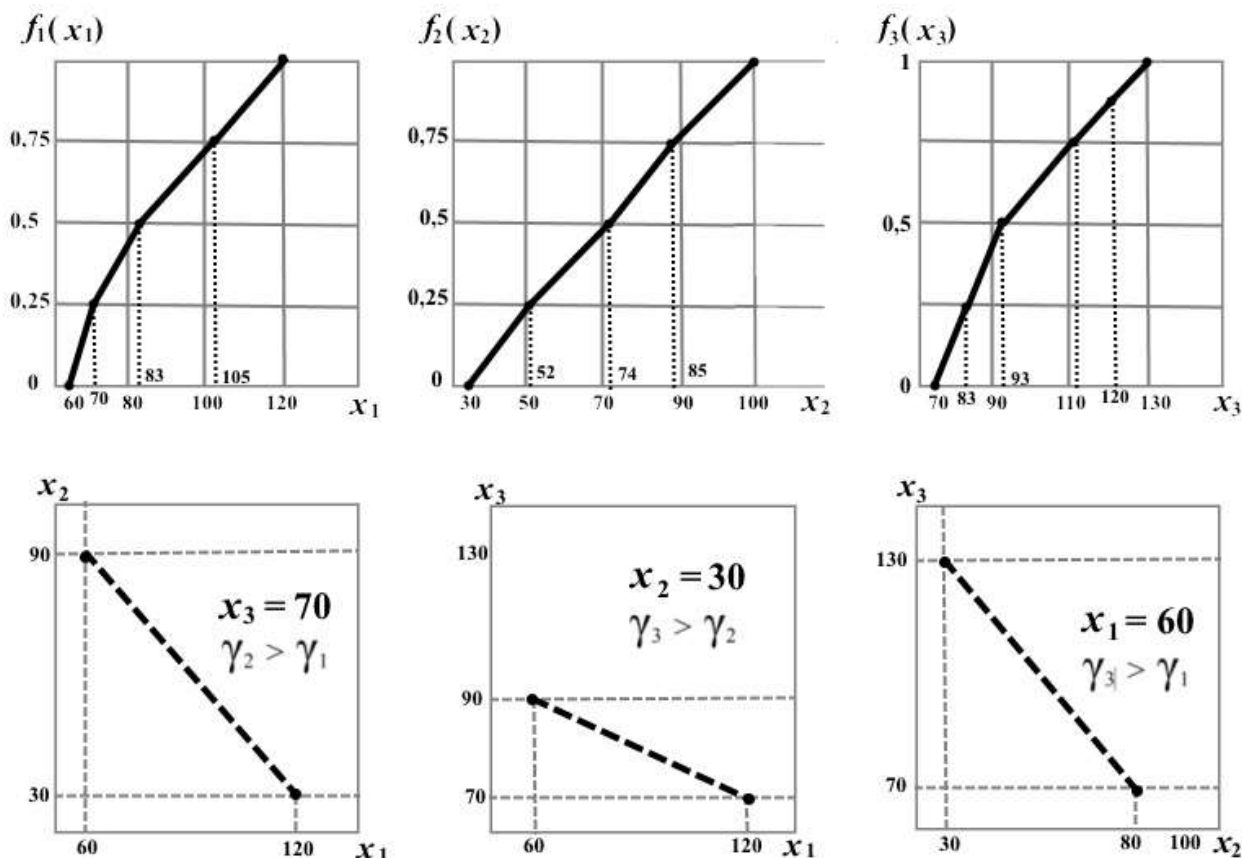


Рис. 5. Функція часткової ефективності методом половинного ділення

За інформацією EK ,

$$x_+^1 = (120, 30, 70)^T \prec x_+^2 = (60, 100, 70)^T \sim (60, 90, 70)^T \Rightarrow \gamma_2 f_2(90) = \gamma_1,$$

$$x_+^1 = (120, 30, 70)^T \prec x_+^3 = (60, 30, 130)^T \sim (60, 30, 70)^T \Rightarrow \gamma_3 f_3(90) = \gamma_1,$$

$$x_+^1 = (60, 100, 70)^T \succ x_+^3 = (60, 30, 130)^T \sim (60, 80, 70)^T \Rightarrow \gamma_2 f_2(80) = \gamma_3.$$

Використовуючи дані часткових функцій ефективності, наведені на рис. 5, розв'яжемо систему лінійних рівнянь,

отриманих після диференціювання нормованої функції:

$$\min \varphi(T) = \min \left((0,73 \cdot \gamma_2 - \gamma_1)^2 + (0,37 \cdot \gamma_3 - \gamma_1)^2 + (0,6 \cdot \gamma_2 - \gamma_3)^2 + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1)^2 \right).$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_1} = -2(0,73\gamma_2 - \gamma_1) - 2(0,37\gamma_3 - \gamma_1) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_2} = 2(0,73\gamma_2 - \gamma_1) \cdot 0,73 + 2(0,6\gamma_2 - \gamma_3) \cdot 0,6 + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_3} = -2(0,37\gamma_3 - \gamma_1) \cdot 0,37 - 2(0,6\gamma_2 - \gamma_3) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -0,73\gamma_2 + \gamma_1 - 0,37\gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,73 \cdot 0,73\gamma_2 - \gamma_1 \cdot 0,73 + 0,6 \cdot 0,6\gamma_2 - \gamma_3 \cdot 0,6 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,37 \cdot 0,37\gamma_3 - \gamma_1 \cdot 0,37 - 0,6\gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 3\gamma_1 + 0,27\gamma_2 + 0,63\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,27\gamma_1 + 1,8929\gamma_2 + 0,4\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,63\gamma_1 + 0,4\gamma_2 + 2,1369\gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}.$$

Після розв'язання системи отримуємо $\gamma_1 = 0,23$, $\gamma_2 = 0,44$, $\gamma_3 = 0,33$.

Тобто при проєктуванні або модернізації локомотивів пріоритет формування його характеристик має бути відповідно до значень вагових коефіцієнтів $\gamma_2 > \gamma_3 > \gamma_1$, а саме, по-перше, вибору зчпної маси локомотива; по-друге, його

економічності і далі запасу палива для забезпечення дальності перевезень без доєкіпірування.

Для отримання вагових коефіцієнтів і корегування часткових функцій ефективності проведемо додатковий аналіз за участі *ЕК*:

$$x_+^{2,3}(60,100,130)^T \sim x_+^1(120,30,70)^T \sim (60,90,70)^T \quad \gamma_2 f_2(90) = \gamma_1,$$

$$x_+^{1,3}(120,30,130)^T \sim x_+^2(60,100,70)^T \sim (60,30,110)^T \quad \gamma_3 f_3(110) = \gamma_2,$$

$$x_+^{1,2}(120,100,70)^T \sim x_+^3(60,30,130)^T \sim (110,30,70)^T \quad \gamma_1 f_1(110) = \gamma_3.$$

Розв'язуємо систему лінійних рівнянь, отриманих шляхом диференціювання нормованої функції:

$$\min \varphi(T) = \min \left((\gamma_2 f_2(90) - \gamma_1)^2 + (\gamma_3 f_3(110) - \gamma_2)^2 + (\gamma_1 f_1(110) - \gamma_3)^2 + (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1)^2 \right).$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_1} = -2(\gamma_2 f_2(90) - \gamma_1) - 2(\gamma_1 f_1(110) - \gamma_3) \cdot f_1(110) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_2} = 2(\gamma_2 f_2(90) - \gamma_1) \cdot f_2(90) + 2(\gamma_3 f_3(110) - \gamma_2) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \varphi(T)}{\partial \gamma_3} = 2(\gamma_3 f_3(110) - \gamma_2) \cdot f_3(110) - 2(\gamma_1 f_1(110) - \gamma_3) + 2(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -0,78\gamma_2 + \gamma_1 - (0,83\gamma_1 - \gamma_3) \cdot 0,83 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ (0,78\gamma_2 - \gamma_1) \cdot 0,78 + 0,75\gamma_3 + \gamma_2 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \\ (0,75\gamma_3 - \gamma_2) \cdot 0,75 - 0,83\gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2,689\gamma_1 + 8,22\gamma_2 + 0,17\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,22\gamma_1 + 2,608\gamma_2 + 0,25\gamma_3 - 1 = 0 \\ 0,17\gamma_1 + 0,25\gamma_2 + 2,563\gamma_3 - 1 = 0 \end{cases}$$

Тоді $\gamma_1 = 0,324$, $\gamma_2 = 0,323$, $\gamma_3 = 0,337$.

Тобто після уточнення слід формувати пріоритет його характеристик відповідно до значень вагових коефіцієнтів $\gamma_3 > \gamma_1 > \gamma_2$.

Висновки

1. Показано, що для визначення характеристик локомотивів, що проєктуються або модернізуються, доцільно обирати їхні часткові відносні характеристики, які необхідно звести до єдиної безрозмірної шкали. З урахуванням цього показано, що як основні часткові характеристики доцільно обирати дальність перевезень без доекіпірування, зчіпну масу та економічність локомотива.

2. За даними експертних оцінок визначено часткові середньоексплуатаційні характеристики локомотивів і діапазон їхньої зміни, що дало можливість найбільш інформативно оцінювати структуру досягнення ефективності для проєктованих або модернізованих локомотивів, яка визначається з урахуванням часткових функцій ефективності.

3. За спеціальними алгоритмами на конкретних прикладах показана процедура вибору оптимальних часткових відносних характеристик локомотива, які забезпечують його оптимальну ефективність відповідно до оцінених коефіцієнтів переваги $\gamma_3 > \gamma_1 > \gamma_2$.

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт України: Закон України від 06.09.2019 р. за № 1196-1. URL: https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=66737 (дата звернення: 13.03.2023).
2. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки (затверджена Постановою КМУ 16.12.2000 р. № 1390 із змінами від 26.10.2011 р. № 1106). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-%D0%BF#Text> (дата звернення: 13.03.2023).
3. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки. Київ: ДНДЦ Укрзалізниці, 2009. 299 с.

4. Понтичелли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4. 74 с.
5. Тартаковський Е. Д., Уманець М. Г., Аулін Д. О. Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2006. Вип. 72. С. 82-86.
6. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Оцінка життєвого циклу локомотивів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2001. Вип. 46. С. 55-58.
7. Egamberdiev B., Lee K., Lee J. & Burnashev S. A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway*. 2016. Vol. 9(1). P. 10-14.
8. Ochkasov O., Shvets O. & Černiauskaitė L. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2017. Vol. 8. P. 68-71.
9. Калабухін Ю. Є., Тартаковський Е. Д. Теоретичні положення оновлення тягового рухомого складу з урахуванням життєвого циклу. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. Вип. 111. С. 106-120.
10. Bodnar B., Ochkasov A., Bobyr D. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2016. № 7. P. 109-114.
11. Klöpffer Ed. W. Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment, Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. 262 p.
12. Banar M. and Özdemir A. An evaluation of railway passenger transport in Turkey using life cycle assessment and life cycle cost methods. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 41. P. 88-105.
13. Bismark R. D. K. Agbelie, Samuel Labi, Kumares C. Sinha. Estimating the marginal costs of bridge damage due to overweight vehicles using a modified equivalent-vehicle methodology and in-service data on life-cycle costs and usage. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2017. Vol. 95. P. 275-288.
14. Johannes Auer, Niki Bey, Johannes-Marius Schäfer. Combined Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing in the Eco-Care-Matrix: A case study on the performance of a modernized manufacturing system for glass containers. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 141. P. 99-109.
15. Carvalhaes B. B., Rosa R. A., D'Agosto M. A., Ribeiro G. M. A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2017. Vol. 51. P. 29-42.
16. Калабухін Ю. Є., Фалендиш А. П. Визначення економії експлуатаційних витрат маневрових тепловозів. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2003. Вип. 54. С. 127-132.
17. Douglas H., Roberts C., Hillmanssen S., Schmid F. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. *Energy Convers Manag*. 2015. 106:1149–1165.
18. Калабухін Ю. Є. Методологія та результати оцінки техніко-економічних показників використання сучасних маневрових тепловозів для роботи на маневровій горці. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2009. Вип. 110. С. 19-30.
19. Gurov S. V., Utkin L. V. Reliability and optimization of systems with periodic modifications in the probability and possibility contexts, *Microelectron. Reliab*. 1997. Vol. 37, No. 5. P. 801-808

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

Тел.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Залата Андрій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Мацегора Дмитро Олександрович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 1445612. E-mail: macegoradmitry@gmail.com.

Лагерева Олена Володимирівна, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 0905604. E-mail: lagereva@kart.edu.ua.

Васильєв Максим Віталійович, магістрант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 2414985. E-mail: maksvasilev1995@gmail.com.

Krashenin Olexsandr Semenovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0001-7462-3372.

Tel.: +38 (097) 9917099. E-mail: krashenin@kart.edu.ua.

Shapatina Olha Olexsandrivna, PhD (Tech), associate professor of department of management of freight and commercial work, Ukraine state university of railway transport. Tel.: ORCID ID: 0000-0002-9185-6212.

Tel.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Matsegora Dmytro Olexsandrovich, postgraduate student Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 1445612. E-mail: macegoradmitry@gmail.com.

Lagereva Olena Volodymyrivna, postgraduate student Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 0905604. E-mail: lagereva@kart.edu.ua.

Vasilev Maksim Vitaliyovych, master's student Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 2414985. E-mail: maksvasilev1995@gmail.com.

Статтю прийнято 08.06.2023 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.256:681.32

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ КІЛЬКІСНИХ ОЦІНОК БЕЗПЕКИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ З ЗАСТОСУВАННЯМ ПІДХОДІВ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ

Канд. техн. наук В. В. Гаєвський

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE FORMATION OF QUANTITATIVE ASSESSMENTS OF SAFETY OF AUTOMATED RAIL TRANSPORT CONTROL SYSTEMS USING RISK MANAGEMENT APPROACHES

PhD (Tech.) V. Gaievskyi

Анотація. У статті розглянуто питання удосконалення методології проведення ідентифікації та оцінювання граничних меж існуючих ризиків технічної експлуатації та технічного обслуговування автоматизованих систем керування залізничного транспорту, визначення та класифікації рівня тяжкості наслідків відмов для подальшого вибору відповідних методів ризик-менеджменту, що будуть застосовані при розробленні інноваційних керуючих систем інфраструктури залізничного транспорту.

Ключові слова: автоматизовані системи керування, технічна експлуатація та обслуговування, ризик-орієнтований підхід.

Abstract. The article examines the issues of improving the methodology for identification and assessment of the limits of existing risks of technical operation and maintenance of automated railway transport control systems, determining and classifying the level of severity of the consequences of failures for the further selection of appropriate risk management methods that will be applied in the development of innovative control systems of railway infrastructure transport.

To resolve the issue, it is proposed to consider the effects of external factors and means of the system itself, which are designed to reduce risk in order to comply with a given level of functional safety using a risk-oriented approach.

The main functions of risk are defined: protective, analytical, innovative, regulatory.

The risk management process is based on the results of risk identification and assessment in order to reduce the consequences of dangerous factors and threats, based on the results of which a structural block diagram of the process was built using the principle "as low as reasonably achievable" (ALARP).

9 stages of risk management are defined:

- risk assessment of potential consequences;
- decision-making regarding risk and its acceptability;
- development of measures to eliminate risks or reduce them to the lowest acceptable level;
- determination of risk probabilities and completion of the table of risk probabilities - categories of the probability of occurrence of dangerous factors or threats;
- assessment of the severity of their consequences and completion of the risk severity table with the definition of the severity category of the consequences of dangerous factors;

- *determination and classification of the level of severity of the consequences of train traffic control system failures;*
- *assessment of risk acceptability using the risk assessment matrix and determination of risk acceptability indices;*
- *risk assessment and decision-making regarding the acceptability or unacceptability of risks.*
- *making a decision about the need to control the assessed risk.*

According to the results of the study, taking into account simplifications and assumptions, it was determined that the most vulnerable elements of the control system and timely and high-quality maintenance require identification and assessment of risks. That is, using statistical data on the failure of technical equipment on the one hand and statistical data on their technical maintenance, it is possible to calculate and assess risk levels and determine and classify the level of severity of the consequences of failures and the degree of their acceptability using quantitative and qualitative methods.

The obtained results will be applied to the selection of appropriate risk management methods and further improvement of automated management systems by expanding their capabilities and providing them with additional functions.

Keywords: *automated control systems, technical operation and maintenance, risk-oriented approach.*

Вступ. Протягом життєвого циклу всі автоматизовані системи керування залізничного транспорту зазнають різних відмов, заважальних впливів, які призводять до виникнення інших впливів, що негативно позначаються як на безпечності (відсутності неприпустимого ризику завдання об'єктом шкоди під час його роботи, технічного обслуговування, зберігання чи транспортування), так і надійності (імовірність того, що пристрій може виконувати свою функцію при заданих умовах в певному інтервалі часу) [1].

Відмови в системі, що експлуатується в рамках застосування та умовах навколишнього середовища, впливають на її поведінку. Усі відмови негативно позначаються на надійності системи, однак лише деякі специфічні відмови мають негативний ефект щодо безпеки.

Технічні принципи для безпеки ґрунтуються насамперед на відомостях про всі можливі небезпечні стани в системі при всіх режимах експлуатації, технічного обслуговування і стані навколишнього середовища.

Цілісність безпеки розглядається як імовірність того, що система виконує встановлені вимоги щодо безпеки при всіх

регламентованих умовах протягом певного проміжку часу.

У процесі технічної експлуатації системи керування рухом поїздів зазнають впливів відмов і збоїв у роботі, серед яких важливими є:

- відмова зі спільної причини – відмова як наслідок події чи подій, які викликають збіг аварійного стану двох чи більше компонентів, що призводить до того, що система не може далі виконувати свою необхідну функцію;

- залежна відмова – відмова, що є наслідком кількох подій, чия ймовірність не може бути подана як простий добуток абсолютних імовірностей окремих подій.

Отже, цілісність безпеки автоматизованих систем керування може розглядатися як комбінація статистично досліджуваних елементів (принципово пов'язаних з апаратним забезпеченням, тобто випадковими відмовами) і статистично недосліджуваних елементів (принципово пов'язаних із систематичними відмовами в програмному забезпеченні, документах, процесах тощо) [1].

Ці питання безпосередньо залежать від процесів технічної експлуатації системи і її технічного обслуговування та

розглядаються як комбінація всієї технічної та адміністративної діяльності включаючи заходи з нагляду для того, щоб утримувати її у стані або знову привести до стану, у якому вона може виконувати необхідну функцію.

У цій роботі прийнято обмеження, що під автоматизованою системою керування розглядається мікропроцесорна система керування рухом поїздів, а саме мікропроцесорна централізація. Але цей підхід можна застосовувати до будь-якої системи автоматизації на залізничному транспорті. Також прийнято спрощення, що впливи на безпечність і надійність апаратної та програмної складових автоматизованих систем керування потребують окремого дослідження і в цій роботі не розглядаються.

Окрім того, ураховується, що, за роботою [2], найбільша кількість транспортних подій у галузі сигналізації та зв'язку трапляється через порушення технології виконання робіт і невиконання робіт, передбачених планами. Згідно з аналізом транспортних подій, віднесених до господарств за період з 2013 по 2021 роки, характерними причинами є:

- порушення технології виконання робіт при технічному обслуговуванні пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ);
- невиконання робіт, передбачених планами технічного обслуговування пристроїв СЦБ, інструкціями та керівними вказівками УЗ;
- розкрадання, навмисне пошкодження пристроїв;
- заводський брак компонентів, схемні недоліки, стихійні лиха, впливи грозових і комутаційних розрядів.

Також важливими причинами можуть бути відмови та збої в апаратній і програмній складових мікропроцесорних систем керування рухом поїздів, але статистичні дані про такі випадки за роки експлуатації цих систем в АТ «Укрзалізниця» відсутні.

Тобто на технічну експлуатацію автоматизованих систем керування негативно впливає людський фактор, пов'язаний як з їхньою технічною експлуатацією, так і якістю проведення технічного обслуговування та якістю самої системи протягом усього життєвого циклу від розроблення до утилізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання ризик-орієнтованих підходів у сучасному світі набирає обертів майже у всіх галузях промисловості, оскільки ризик виникнення несприятливих подій є однією з головних проблем сучасного виробництва і головним критерієм реалізації безпеки.

Застосування ризик-менеджменту як перспективного напрямку розвитку транспортних систем дасть змогу стабілізувати і підвищити ефективність їхньої діяльності [3].

Слід зазначити, що нині керування ризиками в залізничній галузі України має фрагментарний характер і більше стосується вирішення питань керування ризиками насамперед підприємств залізничного транспорту: господарськими, ризикам фінансового планування та сфери державного керування залізничним транспортом. Ці питання висвітлюються в публікаціях таких вітчизняних учених, як Ткаченко І., Бутько Т., Воловельська І., Дикань В., Дячков Д., Крихтіна Ю., Мостенська Т., Панченко Н., Посохов І., Скопенко Н., Токмакова І., Харченко В., Череватенко О. та ін. [3-10].

Визначення граничних рівнів ризику та застосування ефективних проактивних заходів керування ризиками при експлуатації авіаційного транспорту, що також є об'єктом критичної інфраструктури, викладено в роботах Реви О., Борсука С., Шульгіна В. [11, 12].

У різних дослідженнях [13-16] розглянуто принципи побудови та функціонування систем залізничної автоматики, а також методи забезпечення безпеки і працездатності цих систем. Однак

не всі роботи приділяють достатню увагу сучасним методам і технічним рішенням щодо забезпечення їхнього працездатного стану, а більшість досліджень викладено на прикладі застарілих систем залізничної автоматики. Тому для більш ефективного та безпечного функціонування залізничної автоматики необхідно враховувати нові технологічні рішення та методи.

За джерелами [17-19], керування ризиками має бути основою системи керування безпекою на залізничному транспорті. Структурований підхід у керуванні безпекою дає змогу ідентифікувати небезпеки та постійно керувати ризиками. Цей підхід урахує спільні ризики всіх учасників організації залізничних перевезень, що дає змогу задовольнити інтереси всіх учасників бізнес-відносин, удосконалити систему корпоративного керування та забезпечити прийняття більш виважених управлінських рішень.

У роботі [20] розглянуто керування ризиками при експлуатації та технічному обслуговуванні залізниць шляхом їхньої ідентифікації та впровадження методів їхньої мінімізації, що дасть змогу зменшити кількість нещасних випадків, а отже, підвищить рівень безпеки на залізничному транспорті. Однак ідентифікація ризиків у цьому дослідженні проводиться лише на основі технічних і нетехнічних характеристик.

Існуючі методики оцінювання ризиків в інших країнах базуються на цифрових технологіях і аналітичній методології керування. Однак існуюча система оцінювання ризиків в Україні не є адекватною, тому необхідно розробити систему керування ризиками, яка б відображала фактичний стан безпеки залізничного транспорту. Вона має передбачати необхідність зниження існуючих рівнів ризику та підтримки рівня ризику на рівні або нижче встановленого рівня. Такий підхід допомагає в прийнятті рішень, що враховують невизначені умови,

можливі події чи обставини в майбутньому та їхній вплив на досягнення цілей організації щодо функціональної безпеки об'єктів інфраструктури [17-19, 21-27].

Дослідженню проблеми керування працездатністю технічних засобів систем сигналізації залізничного транспорту на основі ризиків їхнього функціонування на основі системного підходу присвячена робота [28]. У ній визначено, що на сьогодні вирішення проблеми знаходиться на початковому етапі завдяки відсутності єдиного трактування понять, спільних підходів, а також відсутності наглядних практичних рекомендацій щодо реалізації системи керування ризиками на українських залізницях.

Аналізом діючих стандартів ЄС визначено, що функції безпеки всередині автоматизованої системи керування мають здійснюватися з використанням архітектури, методів, засобів і технічних прийомів, наведених у стандартах:

- CENELEC EN 50126 – визначає галузеві вказівки щодо загального процесу RAMS для мінімізації небезпек [1, 29, 30];

- EN 50128 – надає методи, засоби і технічні прийоми для розроблення програмних систем [31-33];

- EN 50129 – визначає процес приймання та схвалення електронних компонентів залізничних систем сигналізації [34];

- серія стандартів IEC 61508 – є ризик-орієнтований підхід до оцінювання безпеки [35]. Залежно від шкоди, що може бути завдана техногенними об'єктами життю або здоров'ю людини чи зовнішньому середовищу, встановлюються відповідні рівні ризику, для зменшення яких передбачено комплекс заходів, що і регламентуються цими стандартами.

Особливістю життєвого циклу безпеки системи керування є те, що на кожному етапі життєвого циклу необхідно здійснювати аналіз небезпек і ризиків. Реалізація подібної вимоги можлива лише за умови ретельного планування, виконання,

послідовного контролю і документування всіх процесів, що відбуваються протягом повного життєвого циклу безпеки в ітеративному порядку [35].

Тобто всі ці стандарти направлені на вирішення питань керування загальними вимогами до залізничної RAMS, оцінювання ризиків, стратегії зниження ризиків, специфікації вимог до залізничних RAMS, елементів залізничних RAMS, а також обґрунтування безпеки для загального процесу забезпечення надійності та безпеки для залізничного транспорту, але в них не надано практичних рекомендацій щодо реалізації RAMS.

Також потрібно констатувати, що майже у всіх вищезгаданих дослідженнях і стандартах недостатню увагу приділено питанням методології проведення ідентифікації та оцінювання граничних меж існуючих ризиків, пов'язаних з технічною експлуатацією і технічним обслуговуванням автоматизованих систем керування залізничного транспорту.

Усе вищенаведене обумовлює необхідність проведення досліджень застосування системного підходу до питань ідентифікації, оцінювання та керування ризиками автоматизованих систем керування для подальшого їхнього вдосконалення, використовуючи ризик-орієнтовані підходи, що є актуальним.

Визначення мети та завдання дослідження. Для вирішення поставленого питання запропоновано ідентифікувати і оцінити граничні межі існуючих ризиків, пов'язаних з технічними експлуатацією і обслуговуванням автоматизованих систем керування залізничного транспорту, визначити і класифікувати рівні тяжкості наслідків відмов з урахуванням впливів зовнішніх факторів і засобів самої системи, призначених для зниження ризику, що мають досягти необхідного зниження ризику для системи в цілому з метою дотримання заданого рівня функціональної безпеки, використовуючи ризик-орієнтований підхід.

Основна частина дослідження. За ДСТУ ISO Guide 73 [36], ризиком вважається невизначеність щодо досягнення цілей. Також можна охарактеризувати ризик як імовірність реалізації події, що завдає шкоди.

Оцінювання ризику включає оцінювання можливості і наслідків. Як правило, можливість заподіяння шкоди обумовлює порушення, а ймовірність того, що ця можливість буде реалізована в певний момент часу, є ймовірністю ризику.

Основними функціями ризику є:

1) захисна — проявляється в тому, що має вироблятися раціональне ставлення до невдач;

2) аналітична — наявність ризику передбачає необхідність вибору одного з можливих варіантів правильного рішення;

3) інноваційна — проявляється у стимулюванні пошуку нетрадиційних рішень проблем;

4) регулятивна — має суперечливий характер і виступає у двох формах: конструктивній і деструктивній [23].

За роботами [1, 37-39], ідентифікація ризику включає процес виявлення, усвідомлення, складання переліку та описування елементів ризику – джерел небезпек, небезпечних факторів, загроз, небезпечних подій, їхніх потенційних наслідків, імовірностей виникнення.

Оцінювання ризику включає процес порівняння оціненого ризику з конкретними критеріями ризику для визначення їхньої значущості та є необхідним для подальшого прийняття рішень щодо їхньої обробки. Це є найбільш ефективним запобіжним заходом, під час якого враховуються можливі транспортні події і небезпеки, що можуть викликати негативні наслідки. Він дає змогу формувати і запроваджувати заходи щодо зниження ймовірності виникнення небезпек.

Ідентифікацію і оцінювання ризиків необхідно проводити по кожній системі керування з урахуванням усіх факторів під час її технічної експлуатації та технічного обслуговування.

Керування ризиками є скоординованою діяльністю з прийняття управлінських рішень і контролю за діяльністю щодо ризиків і спрямованою на забезпечення мінімально можливого (припустимого) їхнього рівня.

Під час ідентифікації небезпечних факторів або загроз необхідно звертати увагу на зміни в Законах України, Директивах ЄС або інших нормативно-правових актах і такі фактори:

- оновлення чи зміни в технологічних процесах роботи систем керування, впровадження нового чи модернізації існуючого устаткування;
- нові або змінені виробничі процеси, здійснювані при експлуатації систем;
- модифікація захисних пристроїв, обладнання чи заходів безпеки у сфері безпеки руху;
- зміни в технології обслуговування враховуючи можливість залучення підрядних організацій до аутсорсингу.

Ідентифікація небезпечних факторів або загроз є постійним, безперервним і повсякденним процесом, що має використовувати як внутрішні, так і зовнішні джерела інформації з обов'язковим документуванням усіх процедур. При цьому особливу увагу слід приділяти перспективам змін технологічних процесів роботи як підрозділів залізничної інфраструктури, що відповідають за технічну експлуатацію і технічне обслуговування, так і зміни в самій автоматизованій системі керування, її елементів, основного та додаткового обладнання, персоналу та ін.

Також обов'язково слід ураховувати всі можливості виникнення цих факторів від малоімовірних до дуже імовірних (неминутих). Така ідентифікація виявляє можливість виникнення найгірших умов і потребує встановлення межі між імовірно найгіршими умовами і такими умовами, які настільки залежать від збігу обставин, що їх не потрібно брати до уваги.

Необхідність проведення ідентифікації небезпечних факторів або загроз і оцінювання ризиків також розглядається:

- за наявності потреби визначити ефективність і об'єктивність запроваджених заходів;
- якщо результати розслідування подій, що вже трапились, вказують на необхідність проведення повторної ідентифікації небезпечних факторів або загроз і оцінювання ризиків;
- якщо під час проведення внутрішніх аудитів (нагляду, контролю) виявлено невідповідності, прийняття рішення щодо усунення яких можливе за допомогою проведення ідентифікації небезпечних факторів або загроз і оцінювання ризиків.

За результатами ідентифікації небезпечних факторів або загроз і оцінювання ризиків, пов'язаних зі змінами, слід визначити:

- появу нових небезпек у зв'язку з запровадженням певних змін і ризиків, пов'язаних з цими небезпеками;
- зміну ризиків, пов'язаних з іншими небезпеками;
- потребу в запровадженні інших заходів безпеки.

Встановлені ризики потребують аналізу, який має такі цілі:

- ідентифікація загроз, пов'язаних із самою системою;
- ідентифікація подій, що викликають ці загрози;
- визначення ризику, пов'язаного з загрозами;
- розроблення процесу безперервного керування ризиком.

Вимоги першого етапу аналізу:

- а) систематичний пошук і класифікація всіх ризиків, можливих за нормальних умов;
- б) ідентифікація прихованих загроз;
- в) виявлення частоти виникнення подій, пов'язаних із існуючими загрозами;
- г) виявлення/оцінювання розміру впливів існуючих загроз;

д) виявлення ризику системи, пов'язаного з кожною загрозою.

Другим етапом аналізу є визначення та класифікація допустимості ризиків, що відповідають кожній відомій загрозі.

Третій етап полягає в розробленні протоколу загроз як базису для керування ризиком.

За результатами аналізу приймають рішення щодо потреби в подальшій ідентифікації небезпек і оцінюванні ризиків.

Ідентифікація небезпечних факторів або загроз полягає у визначенні всіх об'єктів, суб'єктів, ситуацій або дій (чи їхнього поєднання). Перед початком проведення робіт з ідентифікації небезпечних факторів або загроз визначають вхідні дані, а також способи та джерела їх отримання.

Вхідними даними є:

- нормативні вимоги;
- політика та програма забезпечення безпеки системи керування;
- дані за результатами аналізу фактичних показників;
- дані щодо розслідування випадків порушення нормальної роботи системи керування;
- результати внутрішніх аудитів (нагляду, контролю);
- дані за результатами попереднього визначення небезпек і оцінювання ризиків.

Способи і джерела отримання вхідних даних:

- спостереження за режимом і методами роботи, аналіз основних причин небезпечної ситуації;
- зіставне оцінювання;
- аналіз роботи системи;
- оцінювання стану виконання робіт щодо можливості виникнення ризикової ситуації;
- документація, зокрема нормативно-правові акти, інструкції та ін.

Під час ідентифікації небезпечних факторів або загроз розглядають різні види робіт і ситуацій, щоб виявити небезпеки, постійно присутні за нормальних умов

роботи системи керування (технічна експлуатація і технічне обслуговування), а також небезпеки, вплив яких можливий за відхилення від нормальних умов роботи та аварійних ситуацій.

Подальший процес керування ризиками складається з декількох етапів.

Перший етап. Оцінювання ризиків потенційних наслідків, до яких можуть призвести небезпечні фактори або загрози, має здійснюватися у формі аналізу потенційних небезпечних факторів, що становлять загрозу за двома критеріями:

- імовірність настання події чи умов, що завдають шкоди;
- серйозність наслідків події чи умови, якщо вони настануть.

Результатом цього етапу є перехід до **другого етапу** – прийняття рішення стосовно ризику та його прийнятності.

Для цього можна застосовувати матрицю прийнятності ризику, остаточною структурою якої визначається з урахуванням місцевих умов.

Третім етапом є розроблення заходів стосовно усунення ризиків чи зниження їх до найменшого прийняттого рівня з урахуванням необхідності розроблення та застосовування засобів контролю ризиків у формі:

- розроблення нових процедур;
- корегування або зміни методів керування;
- внесення змін до порядку підготовки персоналу;
- модернізації або заміни систем керування на такі, що побудовані за принципами ризик-орієнтації, самоорганізації, самонавчання тощо.

Отже, процес керування ризиками будується на результатах оцінювання ризиків з метою зниження наслідків небезпечних факторів і загроз.

Структурну блок-схему процесу з використанням принципу «так низько, як розумно можна здійснити» (ALARP) наведено на рис. 1.

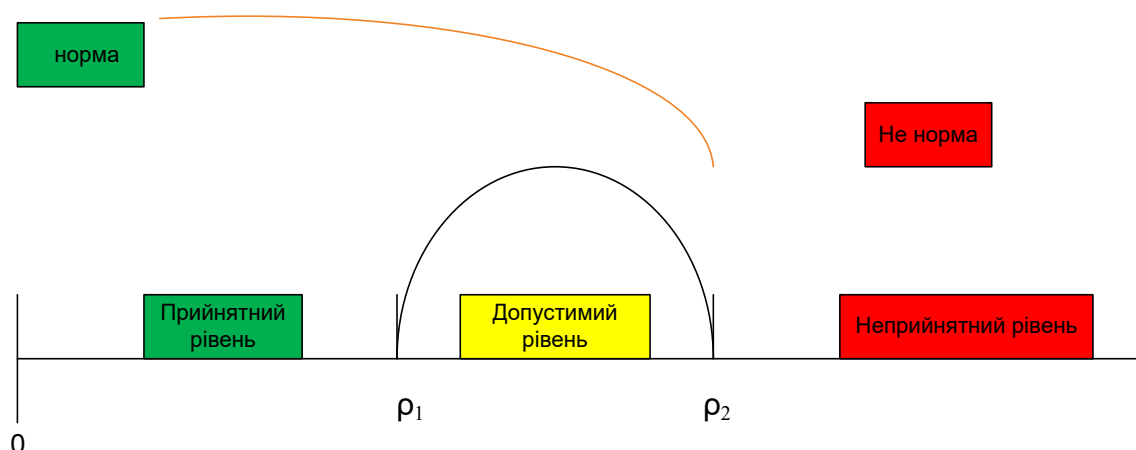


Рис. 1. Структурна блок-схема процесу керування ризиками

Область прийнятного рівня ризику пояснюється його об'єктивним характером (безумовно, треба прагнути до цього, але в реаліях це практично неможливо).

Область допустимого рівня ризику – це область розумного ризику.

Ризики, що за результатами оцінювання потрапляють до області неприйнятного ризику, є недопустимими за будь-яких обставин. Недопустимий ризик можна знизити до прийнятної зони шляхом проведення профілактичних, організаційних, організаційно-технічних заходів для зниження потенціалу наслідків подій за умови, якщо вони настануть, або припинення виду діяльності, яка становить ризик.

Ризики, які за результатами оцінювання потрапляють до прийнятної зони, вважаються прийнятними за умови, що вжиті заходи щодо їхнього зниження гарантують, що прогнозована імовірність і серйозність наслідків небезпечних факторів або загроз перебуває в межах цієї зони.

Четвертий етап. При оцінюванні визначається імовірність ризику – можливість виникнення небезпечних подій чи умов. Категорії, що характеризують імовірність виникнення небезпечних факторів або загроз, заносяться до таблиці імовірності ризику (табл. 1) з присвоєнням відповідних ступенів (величин) ризику з урахуванням специфіки та практичного розуміння значення частоти їх виникнення [28].

Таблиця 1

Імовірності ризику – категорії імовірності виникнення небезпечних факторів або загроз

Імовірність виникнення небезпечних факторів (події чи умов)	Значення	Ступінь (величина) ризику	Практично розумні значення частоти: 1 раз на ...
Часто	Трапляється дуже часто	5	тиждень
Періодично	Трапляється інколи	4	місяць
Рідко	Імовірність виникнення мала	3	квартал
Малоймовірно	Імовірність виникнення дуже мала	2	рік
Майже неможливо	Імовірність виникнення майже неможлива	1	життєвий цикл

П'ятий етап. Після оцінювання імовірності виникнення небезпечних факторів або загроз оцінюється серйозність їхніх наслідків (серйозність ризику), оцінювана як тяжкість наслідків небезпечних факторів або загроз. При цьому враховують імовірність найгірших наслідків, що можуть настати внаслідок дії небезпечного фактора.

Категорії, що характеризують рівні ризику, заносяться до таблиці серйозності ризику, які позначаються буквами латинського алфавіту (табл. 2).

Шостий етап. Аналогічно визначаються та класифікуються рівні тяжкості наслідків відмов (табл. 3).

Таблиця 2

Серйозність ризику – категорії тяжкості наслідків небезпечних факторів

Серйозність ризику	Імовірні наслідки	Рівень ризику
Катастрофічна	- значні людські жертви; - знищення обладнання, майна	A
Небезпечна	- серйозні тілесні ушкодження; - значне пошкодження обладнання, майна; - серйозне зниження рівня безпеки руху, настання фізичного стресу чи такого робочого навантаження, при якому нема впевненості в правильному і повному виконанні завдань персоналом підприємства	B
Значна	- аварія; - незначні тілесні ушкодження; - суттєве зниження рівня безпеки руху, зниження можливостей персоналу підприємства впоратися з несприятливими експлуатаційними умовами внаслідок збільшення робочого навантаження чи виникнення умов, що знижують ефективність їхньої роботи	C
Незначна	- інцидент; - пошкодження; - виробничі обмеження	D
Несуттєва	несуттєві наслідки	E

Таблиця 3

Класифікація рівня тяжкості наслідків відмов системи керування

Характеристика тяжкості відмови	Опис	Рівень
Катастрофічний	Вид відмови, що може спричинити руйнування системи	4
Небезпечний	Вид відмови, що може спричинити серйозне пошкодження системи, яке призведе до зриву виконання поставленого завдання та значних затримок поїздів	3
Значний	Вид відмови, що може спричинити незначне пошкодження системи, яке призведе до затримки чи зниження ефективності виконання функцій	2
Незначний	Вид відмови, що не завдає пошкодження комплексу, але призводить до необхідності позапланового обслуговування або незначного ремонту	1

Сьомий етап. Після оцінювання ризику з погляду імовірності та серйозності оцінюють прийнятність ризику.

1. Здійснюється загальне оцінювання ризику за допомогою матриці оцінювання

ризиків (табл. 4), що є комбінованим поєднанням таблиць імовірності ризику, серйозності ризику та тяжкості наслідків відмов системи керування (табл. 1-3), у результаті чого визначається індекс ризику.

Таблиця 4

Матриця оцінювання ризику

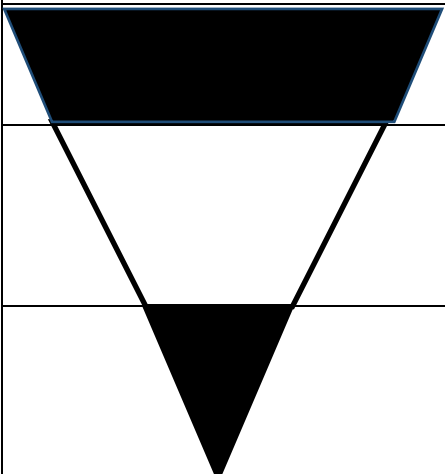
Імовірність ризику	Серйозність ризику				
	катастрофічна А	небезпечна В	значна С	незначна D	несуттєва Е
часто 5	5A4	5B3	5C2	5D1	5E
періодично 4	4A4	4B3	4C2	4D1	4E
рідко 3	3A4	3B3	3C2	3D1	3E
малоймовірно 2	2A4	2B3	2C2	2D1	2E
майже неможливо 1	1A4	1B3	1C2	1D1	1E

2. Визначається індекс прийнятності ризику, який переноситься до матриці прийнятності ризику (табл. 5), що

характеризує критерії прийнятності ризику. Якщо ризик потрапляє до неприйнятної зони, він є неприйнятним.

Таблиця 5

Матриця прийнятності ризику

Рекомендовані критерії	Індекс ризиків	Рекомендовані критерії
	5A4, 5B3, 5C2 4A4 4B3, 3A4	Неприйнятний за певних умов
	5D1, 5E, 4C2, 4D1, 4E 3B3, 3C2, 3D2, 2A4, 2B3, 2C2	Прийнятний з урахуванням заходів щодо зменшення
	3E, 2D1, 2E, 1A4 1B3, 1C2, 1D1, 1E	Прийнятний

Восьмий етап. Оцінювання ризиків, що полягає у визначенні величини ризиків, прогнозу щодо можливих наслідків і ймовірності їх виникнення, прийнятті рішення стосовно прийнятності чи неприйнятності ризиків.

Методи оцінювання ризиків поділяються на якісні та кількісні. Якісний метод полягає у виявленні та ідентифікації причин і видів ризиків. Кількісний метод – це оцінювання частоти ризиків або ймовірності їхніх наслідків.

За результатами оцінювання ризиків визначають ефективність наявних заходів, потребу в їхньому поліпшенні чи запровадженні інших. Якщо нема можливості усунути ризик, то необхідно розглянути можливість зниження ризику до прийняттого рівня, що можна допустити.

Дев'ятий етап. На підставі даних, отриманих при оцінюванні ризику, приймається рішення про необхідність контролю оціненого ризику. Контроль ризику здійснюється шляхом прийняття рішення щодо уникнення ризику, виділення додаткових засобів для його уникнення, вдосконалення чинних процедур зменшення ризиків або розроблення та впровадження нових процедур зменшення ризиків.

Для визначення процедури ідентифікації небезпечних факторів або загроз та оцінювання ризиків автоматизована система керування має вести облік, накопичення, систематизацію та первинний аналіз інформації про всі ситуації з визначенням їхніх передумов, причин і причинно-наслідкового зв'язку.

Конкретні кроки використання керування ризиками надано в Положенні про систему управління безпекою [39], що обов'язково має використовуватися всіма підприємствами та організаціями України. Незважаючи на те, що в цьому нормативному акті акцент зроблено на організаційній складовій експлуатації залізниць, тобто розроблена методика або послідовність дій прийняття управлінського рішення, він перетинається з

запропонованим підходом ідентифікації та оцінювання ризиків автоматизованих систем керування з урахуванням їхньої технічної експлуатації та технічного обслуговування.

Висновки. За результатами досліджень проведено ідентифікацію та оцінювання граничних меж існуючих ризиків технічної експлуатації і технічного обслуговування автоматизованих систем керування залізничного транспорту, визначено та класифіковано рівні тяжкості наслідків відмов.

Визначено основні функції ризику: захисна, аналітична, інноваційна, регулятивна.

Побудовано структурну блок-схему процесу з використанням принципу «так низько, як розумно можна здійснити» (ALARP).

Визначено дев'ять етапів керування ризиками:

- оцінювання ризиків потенційних наслідків;
- прийняття рішення стосовно ризику та його прийнятності;
- розроблення заходів щодо усунення ризиків чи зниження їх до найменшого прийнятного рівня;
- визначення імовірностей ризику та заповнення таблиці імовірності ризику – категорії імовірності виникнення небезпечних факторів або загроз;
- оцінювання серйозності їхніх наслідків і заповнення таблиці серйозності ризику з визначенням категорії тяжкості наслідків небезпечних факторів;
- визначення та класифікація рівня тяжкості наслідків відмов систем керування рухом поїздів;
- оцінювання прийнятності ризику з застосуванням матриці оцінювання ризиків і визначенням індексів прийнятності ризику;
- оцінювання ризиків і прийняття рішення стосовно прийнятності чи неприйнятності ризиків;

- прийняття рішення про необхідність контролю оціненого ризику.

За результатами дослідження з урахуванням обмежень визначено, що ідентифікації та оцінювання ризиків потребують найбільш уразливі елементи системи керування, а також своєчасного та якісного проведення технічного обслуговування. Тобто, використовуючи статистичні дані про відмови технічних засобів, з одного боку, і статистичні дані про проведення їхнього технічного обслуговування – з іншого, можна розрахувати та оцінити рівні ризиків і визначити та класифікувати рівні тяжкості наслідків відмов і ступінь їхньої прийнятності за допомогою кількісних і якісних методів.

При цьому можливе використання як традиційних кількісних методів, що

базуються на статистичних даних про відмови технічних засобів, так і статистичні дані про проведення їхнього технічного обслуговування, сформовані за допомогою якісних методів на основі експертного оцінювання.

Отримані результати можуть знайти застосування для подальшого удосконалення автоматизованих систем керування за рахунок розширення їхніх можливостей і надання їм додаткових функцій.

Подальшим розвитком запропонованого підходу має бути розроблення процедур для автоматизації процесів формування кількісних і якісних оцінок у режимі реального часу, що зменшить вплив так званого людського фактора на формування кінцевого результату.

Список використаних джерел

1. EN 50126-1:2017 CENELEC. Спецификация и доказательство надежности, эксплуатационной готовности, ремонтной пригодности и безопасности (RAMS) для использования на железных дорогах. CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels, 2017. 106 с.
2. Гаєвський В. В. Удосконалення технічної експлуатації систем мікропроцесорної централізації на основі оперативної ідентифікації та локалізації порушень. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/7311> (дата звернення 25.03.2023).
3. Ткаченко І. Ризики у транспортних процесах: навч. посіб. / Нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків, 2017. 114 с.
4. Бутко Т. В., Пархоменко Л. О., Топчій А. В. Формалізація технології функціонування на основі ризик-менеджменту. *Інформаційно-керуючі системи на транспорті*. 2022. № 4. С. 28-32.
5. Дикань В. Л., Воловельская И. В. Специфические особенности системы обеспечения экономической безопасности железнодорожного транспорта. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2016. № 16. С. 63—66.
6. Дикань В. Л., Посохов І. М. Дослідження міжнародних стандартів управління ризиками. *Бізнес Інформ*. 2014. № 1. С. 314—319.
7. Дячков Д. В., Германчук О. О. Формування системи ризик-менеджменту підприємства. *Економічний форум*. 2015. № 4. С. 235—241.
8. Крихтіна Ю. О., Череватенко О. М. Застосування ризик-менеджменту у сфері державного управління залізничним транспортом України. *Теорія та практика державного управління*. 2018. № 2 (61). URL: http://kbuapa.kharkov.ua/e-book/tpdu/2018-2/doc/1/1_5.pdf.
9. Мостенська Т. Л., Скопенко Н. С. Ризик-менеджмент як інструмент управління господарським ризиком підприємства. *Вісник Запорізького національного університету. Серія «Економічні науки»*. 2010. № 3 (7). С. 72—79.

10. Токмакова І. В. Теоретико-методологічні основи забезпечення гармонійного розвитку залізничного транспорту України: автореф. дис. ... д-ра екон. наук: спец. 08.00.03. Харків: УкрДУЗТ, 2016. 46 с.
11. Рева О. М., Борсук С. П., Шульгін В. А. Визначення граничних рівнів ризику під час порушення норми ешелонування повітряного простору. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», 2014. № 9. С. 151–156.
12. Борсук С. П. Ергономічні основи проактивної кваліметрії закономірностей прояву людського чинника в аеронавігаційних системах. URL: https://radats.kname.edu.ua/images/Files/dis_Borsuk.pdf.
13. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ДСТУ ІЕС/ISO 31010: 2013). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf>.
14. Теєг Г., Власенко С. Системы автоматизации и телемеханики на железных дорогах мира. Москва: Интекст, 2010. 496 с.
15. Бочков К. А. Микропроцессорные системы автоматизации на железнодорожном транспорте: учеб. пособие. Гомель: БелГУТ, 2013. 254 с.
16. Автоматизовані станційні системи керування рухом поїздів / В. Мойсеєнко, С. Пархоменко, М. Чепцов, Т. Коцюба. Харків, 2013. 393 с.
17. Commission Implementing Regulation (EU) No 402/2013 of 30 April 2013 on the common safety method for risk evaluation and assessment and repealing Regulation (EC) No 352/2009 Text with EEA relevance. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0402>.
18. Guide for the application of the Commission Regulation on the adoption of a common safety method on risk evaluation and assessment as referred to in Article 6(3)(a) of the Railway Safety Directive. URL: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/guide_for_application_of_cms_en.pdf.
19. Safety Management System. URL: https://www.era.europa.eu/activities/safety-management-system_en.
20. Rahmayana P. E., Purba H. H. Risk management in railway during operation and maintenance period: a literature review. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2019. № 04(04). P. 29–35. URL: <https://doi.org/10.33564/ijeast.2019.v04i04.005>.
21. Bulakh M., Okorokov A., Baranovskyi D. Risk System and Railway Safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. № 666(4), 042074. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042074>.
22. Read G. J. M., Naweed A., & Salmon P. M. Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. P. 188, 352–365. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.038>.
23. El-Koursi, Subhabrata Mitra G. Bearfield Harmonising Safety Management Systems in the European Railway Sector Safety Science Monitor, I P S O Australia. 2018. Vol. 11 (Is. 2). 14 p.
24. Kalem A., Lindov O., Šimić E. Safety Culture in the Function of Optimization of Railway Safety Management System. In: Karabegović, I. (eds) *New Technologies, Development and Application IV*. NT 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 233. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_77.
25. M. Lefsrud L., Macciotta Pulisci R., Nkoro A. Railway Association of Canada, Role of Safety Management Systems (SMS) in the railway industry and potential for enhancement of the Railway Safety Act (RSA). 2017. URL: https://tc.canada.ca/sites/default/files/migrated/appendix_e.pdf.

26. Railway Safety Management System Regulations. (SOR/2015-26). URL: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2015-26/index.html>.
27. Michalak M., Górka W., Bagiński J., Rogowski, D., Soch, M., Stęcli, T., Flisiuk B., Leśniak D., Sikora M. (2020). Central threat register – a complex system for risk analysis and decision support in railway transport. *IET Intelligent Transport Systems*. 2020. № 14(8). P. 970–981. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0695>.
28. Valerii Samsonkin, Vasyl Sotnyk, Oksana Yurchenko, Sergii Zmii, Viktor Myronenko, Oleksandra Soloviova Devising a methodology to manage the performance of technical tools of rail transport signaling systems based on the risks of their functioning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 120. P. 32-43.
29. CENELEC EN 50126 - 1:2017 Railway Applications The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). 2017. Vol. 103.
30. CENELEC EN 50126-2:2018 Railway Applications Dependability for Guided Transport Systems. Part 2: Systems Approach to Safety. 2018. Vol. 77.
31. CENELEC, EN 50128-railway applications-communication, signalling and processing systems-software for railway control and protection systems, Book EN. 2012. Vol. 134.
32. EN 50128. URL: <http://standards.globalspec.com/std/1678027/cenelec-en-50128>, 2019 (дата звернення 17.11.2022).
33. EN 50128. URL: <http://www.railwayresearch.org/IMG/pdf/043.pdf>, 2019 (дата звернення 17.11.2022).
34. CENELEC - EN50129. Railway applications - Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling 17, Avenue Marnix Brussels, 1000 Belgium. URL: <https://standards.globalspec.com/std/13113133/EN%2050129>.
35. IEC 61508-3:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements. URL: <https://tk185.appau.org.ua/61508/standard-iec-61508/standarty-mek-61508> (дата звернення: 27.06.2019).
36. ДСТУ ISO Guide 73:2013. Керування ризиком. Словник термінів (ISO Guide 73:2009, IDT). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2073.pdf>.
37. Ризик–Вікіпедія URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA> (дата звернення 15.11.2022).
38. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 Risk management — Risk assessment techniques (Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf> (дата звернення 10.02.2020).
39. Про затвердження «Положення про систему управління безпекою руху на залізничному транспорті»: Наказ Міністерства інфраструктури України № 842 (2020) (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0351-21#Text>.

Гаєвський Віталій Вікторович, кандидат технічних наук, директор ТОВ «НВП «Залізничавтоматика», ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-5706>. Тел.: +38(067) 573-90-40. E-mail: gaevskiyv54@gmail.com.

Gaievskiy Vitalii, PhD (Tech.), director LLC SPE RAILWAYAUTOMATIC, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7294-5706>. Tel.: +38(067) 573-90-40. E-mail: gaevskiyv54@gmail.com.

Статтю прийнято 28.04.2023 р.

УДК 656.6:629.067

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ СУДНА НА ОСНОВІ МНОЖИННОЇ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ

Канд. техн. наук О. М. Мельник

MODELING THE INTERRELATION BETWEEN ENERGY EFFICIENCY AND SHIP SAFETY BASED ON MULTIPLE LINEAR REGRESSION

PhD (Tech.) O. Melnyk

Анотація. Енергоефективність і безпека судна є двома важливими аспектами морського транспорту, що мають істотне значення для економічної ефективності, захисту довкілля та безпеки мореплавства. Безпека судна – це перш за все захист екіпажу, вантажу і довкілля. Енергоефективні технології в судноплаванні сприяють економічній ефективності, зниженню витрат на паливо, скороченню викидів парникових газів, а головне спрямовані на підвищення маневреності судна, зменшуючи ймовірність його потрапляння в аварійні ситуації; вибір енергоефективних матеріалів і оптимізація конструкції і корпусу підвищують стійкість судна до несприятливих умов. У цій статті досліджується зв'язок між ефективністю використання енергетичних ресурсів і безпекою експлуатації судна. Основною метою дослідження є оцінювання впливу енергоефективності судна на його безпеку в контексті експлуатації. У дослідженні застосовується методика для встановлення зв'язку між незалежними змінними, такими як енергоефективність, технічний стан судна, рівень навичок екіпажу, і залежною змінною – безпекою експлуатації судна. Стаття є результатом аналізу даних флоту компанії, де кожне судно оцінюється за показниками енергоефективності та безпеки. З використанням моделі множинної лінійної регресії пропонується визначення коефіцієнтів впливу кожної незалежної змінної на безпеку судна. Ці коефіцієнти регресії дають змогу оцінити внесок кожного фактора в загальну безпеку судна та виявити найбільш значущі з них. Результати дослідження свідчать про значний вплив енергоефективності судна на безпеку його експлуатації, адже судна з вищими показниками енергоефективності мають високий рівень безпеки в експлуатації. Це дає змогу судновласникам та операторам суден вживати заходів щодо покращення енергоефективності власного флоту для підвищення безпеки та ефективності експлуатації. Результати цього дослідження можуть бути корисними для судновласників, операторів суден, а також представників морських організацій і регуляторних органів, що займаються безпекою судноплавання.

Ключові слова: енергоефективність, безпека судна, морська індустрія, викиди парникових газів, економічна ефективність, маневреність, аварійні ситуації, екіпаж, довкілля, матеріали, конструкція, морський транспорт.

Abstract. Energy efficiency and ship safety are two important aspects of maritime transportation that are essential for economic efficiency, the environment and maritime safety. Ship safety ensures the protection of crew, cargo and the environment. Energy-efficient technologies in shipping contribute to economic efficiency and lower fuel costs, as well as reduce greenhouse gas emissions and, most importantly, increase ship maneuverability, reducing the likelihood of getting into accidents, while the choice of energy-efficient materials and optimization of the structure and

hull increase the ship's resistance to adverse conditions. This article explores the relationship between energy efficiency and ship safety. The main objective of the study is to assess the impact of ship energy efficiency on safety in the context of operation. The study applies a methodology to establish the relationship between independent variables, such as energy efficiency, ship's technical condition and crew training, and the dependent variable, ship's operational safety. The article presents the results of the analysis of the company's fleet data, where energy efficiency and safety indicators evaluate each vessel. Using a multiple linear regression model, the coefficients of influence of each independent variable on ship safety were determined. These regression coefficients allow us to assess the contribution of each factor to the overall safety of the ship and identify the most significant factors. The results of the study indicate a significant impact of ship energy efficiency on operational safety. Vessels with higher energy efficiency indicators have a high level of operational safety. This allows shipowners and ship operators to take measures to improve the energy efficiency of their fleet in order to increase safety and efficiency of operation. The results of this study can be useful for ship owners, ship operators, as well as for representatives of maritime organizations and regulatory authorities involved in shipping safety.

Keywords: energy efficiency, vessel safety, maritime industry, greenhouse gas emissions, economic efficiency, maneuverability, emergencies, crew, environment, materials, construction, maritime transport.

Вступ. На сьогодні сучасний морський транспорт стикається зі значними викликами, пов'язаними з питаннями енергоефективності та безпеки. Зростаючі вимоги до енергоефективності світового флоту є наслідком зростання свідомості про екологічні проблеми та потреби в зменшенні викидів шкідливих речовин і зменшенні споживання палива. Енергоефективність суден стає важливим фактором для забезпечення сталого розвитку морського транспорту і зменшення його впливу на довкілля. В умовах посилення екологічних вимог і прагнення до зниження операційних витрат питання ефективного використання енергії та водночас забезпечення безпеки мореплавання стають усе більш важливими. Саме тому проведення досліджень у галузі енергоефективності суден та оцінювання їхнього впливу на безпеку експлуатації є вкрай актуальним і значущим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові праці за темою дослідження підкреслюють практичний інтерес і є важливим внеском у процес з'ясування принципів взаємозв'язку між енергоефективністю і безпекою судна, а крім того, надають різні підходи і методи

поліпшення ефективності експлуатації та забезпечення безпеки на суднах.

Так, у роботі [1] досліджується оптимізація енергоефективності суден з урахуванням навігаційного середовища та безпеки. Праця [2] присвячена розгляду системи оцінювання безпеки експлуатації шлюзу за допомогою методу варіаційних коефіцієнтів і розширеного методу матеріальних елементів. У роботах [3, 4] досліджується енергоефективність та керування енергією на суднах і встановлюються базові значення індексу енергоефективності проектування для суден на основі перевірених даних. Проведення комплексного аналізу та оцінювання практик енергоефективності суден наведено в роботі [5]. Огляд методів підтримки прийняття рішень, що використовуються при оптимізації корпусів суден для поліпшення енергоефективності, зроблено в роботі [6]. У роботі [7] розроблено метод генерації конфігурації кінцевої програми для платформи керування енергоефективністю судна. У роботі [8] пропонується стратегія підвищення енергоефективності судна на основі моделі оптимізації та підходу, заснованого на обробленні даних. Розгляд концептуальних

принципів забезпечення організаційних і технологічних аспектів безпеки суден запропоновано в роботі [9], забезпечення безпеки навігації з урахуванням зменшення впливу на довкілля – у роботі [10].

Проведені дослідження вказують на розвиток сталого потенціалу енергоефективності судна та його ролі в покращенні безпечної експлуатації. Проте не проводилися дослідження, які б оцінювали ступінь впливу енергоефективності на безпеку суден і визначали ключові фактори, що впливають на цей зв'язок.

Мета та завдання дослідження. Мета цієї статті полягає в оцінюванні зв'язку між енергоефективністю судна та його безпекою в контексті експлуатації з основним фокусом на дослідження ступеня впливу енергоефективності на безпеку судна та виявлення факторів, що сприяють підвищенню безпеки та ефективності експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в дослідженні застосовується метод множинної регресії, що дає змогу

встановити зв'язок між різними незалежними змінними, такими як енергоефективність, технічний стан судна і рівень навчання екіпажу та залежною змінною – фактором безпечної експлуатації судна. Аналіз даних флоту компанії дає змогу отримати результати, що будуть корисні для прийняття рішень щодо покращення енергоефективності та безпеки морського транспорту.

Основна частина дослідження. У морській галузі прагнення до підвищення енергоефективності суден стає дедалі актуальнішим з урахуванням зростаючих вимог до екологічної стійкості та енергозбереження. Не менш важливим залишається дослідження наявності чіткого зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна, оскільки ці два аспекти взаємопов'язані та впливають на загальну продуктивність і ефективність експлуатації судна. Енергоефективність і безпека судна дійсно тісно пов'язані, і існують вагомі докази цього зв'язку. У табл. 1 наведено аргументи, що підтверджують цей зв'язок.

Таблиця 1

Взаємозв'язок факторів безпеки та енергоефективності

Фактор	Опис
1	2
Економічні вигоди	Поліпшення енергоефективності судна призводить до скорочення споживання палива та економії витрат на експлуатацію. Це особливо важливо в контексті високих цін на паливо і суворих нормативів щодо викидів. Підвищена енергоефективність також сприяє стійкій експлуатації судна в довгостроковій перспективі
Операційна безпека	Поліпшення енергоефективності часто супроводжується впровадженням сучасних технологій і систем, що також підвищують безпеку судна. Наприклад, встановлення ефективних систем керування двигуном, автоматизованих систем контролю та спостереження, а також засобів зв'язку і навігації підвищує надійність роботи судна і сприяє запобіганню можливих аварійних ситуацій
Екологічна дія на морське середовище	Підвищена енергоефективність судна також призводить до скорочення викидів шкідливих речовин і зменшення негативного впливу на довкілля. Обмеження викидів скорочує ризики екологічних аварій і покращує загальну безпеку морського середовища

Продовження табл. 1

1	2
Відповідність міжнародним нормам і стандартам	Міжнародні організації, такі як Міжнародна морська організація (ІМО), активно пропагують покращення енергоефективності та безпеки суден. Запровадження різних нормативів і рекомендацій щодо підвищення ефективності суднових систем та операцій забезпечує дотримання високих стандартів безпеки і сприяє зниженню ризиків
Поліпшення умов роботи екіпажу та підвищення рівня комфорту	Інвестиції в підвищення енергоефективності можуть включати такі аспекти, як покращення звуко- і теплоізоляції судна, систем кондиціонування повітря та якості освітлення. Це може значно підвищити комфорт і умови роботи для екіпажу, що у свою чергу сприяє безпеці та продуктивності
Інновації в технологіях безпеки	Поліпшення енергоефективності судна потребує застосування інноваційних технологій, що можуть підвищити безпеку. Наприклад, розроблення автоматизованих систем контролю, датчиків і систем попередження може покращити виявлення та реакцію на потенційні проблеми, що сприяє безпечному функціонуванню судна
Зниження експлуатаційних ризиків	Поліпшення енергоефективності допоможе знизити певні ризики, пов'язані з експлуатацією судна. Наприклад, покращене керування двигуном і системами знижує ймовірність відмов і аварій, а ефективне використання ресурсів, таких як паливо та енергія, допомагає уникнути проблем, пов'язаних з їхньою нестачею чи невідповідністю вимогам
Проактивний підхід до забезпечення безпеки	Підвищена енергоефективність судна потребує систематичного аналізу та оптимізації різних аспектів його роботи. Це включає дослідження та забезпечення безпеки, щоб урахувати потенційні ризики та вжити відповідних заходів заздалегідь. Такий підхід сприяє проактивній безпеці та запобіганню можливим інцидентам або аваріям

Загалом енергоефективність і безпека судна є взаємозалежними аспектами його експлуатації. Поліпшення енергоефективності сприяє економічним вигодам, операційній безпеці, екологічній стійкості та комфорту людей на борту, тоді як дотримання високих стандартів безпеки і застосування інноваційних технологій сприяють підвищенню енергоефективності. Комбінований підхід, що враховує і безпеку, і енергоефективність, дає змогу досягти найкращих результатів.

Застосування енергоефективних технологій і систем також може бути запроваджено через регуляторні заходи, стандарти і положення. Міжнародні організації, такі як ІМО, розробляють і впроваджують нормативні акти, спрямовані на підвищення енергоефективності суден і

забезпечення їхньої безпеки. Такі заходи стимулюють галузь судноплавства до розроблення та використання нових технологій, здатних підвищити як ефективність експлуатації суден, так і їхню безпеку.

Практичні приклади впровадження енергоефективних технологій і систем, що підтверджують стійкий зв'язок між енергоефективністю і безпекою судна, можна спостерігати на сучасних суднах, оснащених передовими системами керування енергоспоживанням, сенсорними технологіями для моніторингу та контролю, а також автоматизованими системами, що не лише знижують витрати на паливо, а й підвищують безпеку судна загалом. Тому енергоефективність і безпека судна взаємопов'язані та взаємозалежні, оскільки

покращення енергоефективності судна не тільки сприяє зниженню операційних витрат і екологічному сталому розвитку, а й підвищує безпеку шляхом застосування сучасних технологій, систем керування та інновацій, підвищуючи функціонал суден.

У цій роботі пропонується простежити, як методика множинної регресії може бути використана для аналізу даних флоту компанії, де кожне судно оцінюватиметься за показниками енергоефективності та безпеки. Це дасть змогу дослідити зв'язок між залежною змінною (наприклад безпекою судна) і кількома незалежними змінними (наприклад енергоефективністю, технічним станом судна, навченістю екіпажу та іншими факторами). Шляхом визначення коефіцієнтів регресії стане можливим оцінити внесок кожної з незалежних змінних, наприклад енергоефективності, у загальну безпеку судна та виявити найбільш значущі фактори, що сприяють підвищенню безпеки та ефективності експлуатації суден.

Дамо множинну регресію в такому вигляді: $\text{Безпека судна} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Енергоефективність} + \beta_2 \times \text{Технічний стан} + \beta_3 \times \text{Навченість екіпажу} + \dots$;

У поданому виразі $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ тощо являють собою коефіцієнти регресії, що визначають вплив кожної незалежної змінної безпеки судна. Модель також може бути розширена для включення більшої кількості факторів і ступеня взаємодії між ними.

Для застосування множинної регресії необхідно мати набір даних, що включає значення залежної та незалежних змінних для кількох суден. Ці дані можна використовувати для оцінювання коефіцієнтів регресії та проведення статистичного аналізу щодо визначення значущості кожного та зв'язку між змінними.

Припустимо, у нас є дані про флот компанії, що складається з 50 суден, з такими показниками:

- безпека судна (виражена числовою шкалою від 1 до 10) – залежна змінна;
- енергоефективність судна (у відсотках) – незалежна змінна;
- технічний стан судна (у відсотках) – незалежна змінна;
- навченість екіпажу (у відсотках) – незалежна змінна.

Сукупні дані подано в табл. 2.

Таблиця 2

Дані про флот компанії з 50 суден

Судно	Безпека	Енергоефективність	Технічний стан	Навченість екіпажу
1	8	0.85	0.90	0.95
2	6	0.70	0.80	0.80
...		...	...	...
50	7	0.75	0.85	0.90

Проаналізуємо взаємозв'язок між енергоефективністю і безпекою судна на основі умовних даних у такий спосіб:

1. Припустимо, у нас є n суден, для яких є такі дані:

• $X_1, X_2, \dots, X_p$ – значення незалежних змінних (енергоефективність, технічний стан, навченість екіпажу) для кожного судна ($i = 1, 2, \dots, n$);

• y – значення залежної змінної (безпека судна) кожного судна ($i = 1, 2, \dots, n$).

2. Для побудови моделі, що описує зв'язок між незалежними змінними та залежною змінною, використовуємо множинну регресію

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_p X_{pi} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

де y_i – значення залежної змінної для судна;

$X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{pi}$ – значення незалежних змінних для судна;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ – коефіцієнти регресії (ваги), що визначають внесок кожної змінної в модель;

ε_i – помилка (залишок), що є незрозумілою варіацією даних.

3. Мета розрахунку полягає в тому, щоб оцінити коефіцієнти регресії $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$, щоб отримати найкращу апроксимацію залежної змінної y на основі незалежних змінних $X_1, X_2, \dots, X_p$.

4. Після оцінювання коефіцієнтів регресії ми можемо використовувати модель для прогнозування безпеки судна на основі нових значень незалежних змінних. Для цього ми підставляємо значення незалежних змінних до рівняння регресії та отримуємо прогнозне значення залежної змінної:

$$\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p. \quad (2)$$

Отже, множинна регресія дає змогу нам апроксимувати залежну змінну на основі незалежних змінних і використовувати отриману модель для прогнозування значень залежної змінної для нових суден.

Після побудови моделі множинної регресії важливо оцінити її якість і ступінь придатності для передбачення залежної змінної. Тому використовуються різні метрики, такі як коефіцієнт детермінації (R^2), середня квадратична помилка (MSE) та інші. Наприклад, додатні значення коефіцієнтів вказують на позитивний зв'язок між незалежною змінною та безпекою судна. Це означає, що збільшення значень цієї змінної сприятиме підвищенню безпеки судна. З іншого боку, від'ємні значення коефіцієнтів свідчать про негативний зв'язок, де збільшення значення незалежної змінної може знизити безпеку судна.

Результати дослідження на прикладі розрахунку множинної регресії для аналізу зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна допоможуть визначити найбільш

значущі фактори впливу на рівень безпеки, що дасть змогу вживати заходів щодо покращення енергоефективності з метою зниження ризиків і підвищення ефективності експлуатації судна.

Припустимо, ми отримали такі коефіцієнти регресії:

- енергоефективність: 1.5;
- технічний стан: 0,8;
- навченість екіпажу: 0.3;
- константа: 3.2 (константа є базовим

рівнем безпеки судна, який залежить від інших змінних моделі).

Ці коефіцієнти можна використовувати для прогнозування безпеки судна на основі значень незалежних змінних. Припустимо, у нас є нове судно з такими значеннями:

- енергоефективність: 0.95;
- технічний стан: 0,88;
- навченість екіпажу: 0.92.

Ми можемо підставити ці значення в рівняння регресії для прогнозування безпеки: $\text{Безпека судна} = 3.2 + 1.5 \times \text{Енергоефективність} + 0.8 \times \text{Технічний стан} + 0.3 \times \text{Навченість екіпажу}$, і отримати рівень безпеки судна ≈ 5.605 .

У цьому випадку з урахуванням наданих коефіцієнтів і значень незалежних змінних отримуємо прогнозну безпеку судна, що дорівнює приблизно 5.605 одиницям. Це означає, що на основі даних про нове судно (його енергоефективність, технічний стан рівень навчання екіпажу) очікується, що рівень безпеки цього судна буде близько 5.605.

Прогнозні значення, отримані за допомогою рівняння регресії, можуть бути корисними для прийняття рішень і оцінювання безпеки судна на основі його характеристик. Однак слід урахувати, що точність прогнозу може залежати від якості моделі та достовірності даних. Для проведення аналізу зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна розглянемо дані про флот судноплавної компанії, що складається з 10 суден, де кожному з суден присвоєно значення рівня безпеки і ступінь енергоефективності (табл. 3).

Таблиця 3

Дані про флот компанії з 10 суден

Судно	Безпека	Енергоефективність
1	8	0.85
2	6	0.70
3	7	0.75
4	9	0.90
5	5	0.60
6	7	0.80
7	6	0.65
8	8	0.88
9	4	0.55
10	7	0.75

Для дослідження та візуалізації статистичного зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна побудуємо графік на основі даних про суди флоту компанії та результатів множинної регресії, що дасть змогу побачити цей зв'язок і візуально оцінити його характер.

Графік на рис. 1 показує, як зміна рівня енергоефективності судна співвідноситься зі зміною рівня безпеки. Це допомагає краще зрозуміти, наскільки важливим є цей зв'язок і які значення енергоефективності можуть передбачати певні рівні безпеки судна.

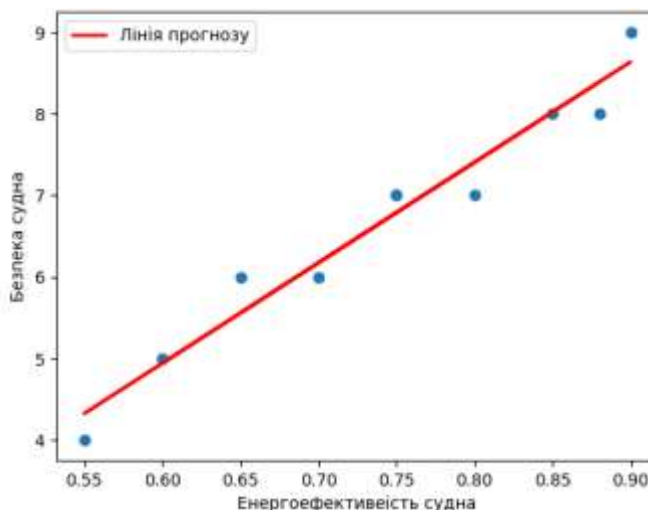


Рис. 1. Зв'язок між енергоефективністю та безпекою судна

Наведений графік і лінія регресії на основі даних про безпеку та енергоефективність судна надають інформацію про зв'язок між цими двома показниками. Аналіз графіка дає змогу визначити позитивну кореляцію між

енергоефективністю і безпекою судна, а також виявити загальну тенденцію, що більш енергоефективні судна зазвичай мають вищий рівень безпеки. Крім того, лінія регресії може бути використана для передбачення рівня безпеки на основі

енергоефективності та валідації моделі лінійної регресії. Загалом графік та лінія регресії надають наукові інструменти для аналізу і розуміння наявності чіткого зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна, а також для прогнозування та оцінювання безпеки суден на основі їхньої енергоефективності.

Наведений нижче тривимірний графік (рис. 2) демонструє взаємозв'язок між енергоефективністю, безпекою та дає змогу побачити розподіл даних і взаємозв'язок між змінними для того, щоб визначити, чи існує

якась видима трендова залежність між енергоефективністю і безпекою судна. Наприклад, якщо існує позитивний зв'язок між цими змінними, то судна з більш високим ступенем енергоефективності можуть мати вищий рівень безпеки.

Крім того, графік може допомогти виявити викиди або аномальні значення даних у контексті відмінного відхилення від загального розподілу, що може вказувати на особливо характерні судна з надзвичайно високим або низьким рівнем безпеки.

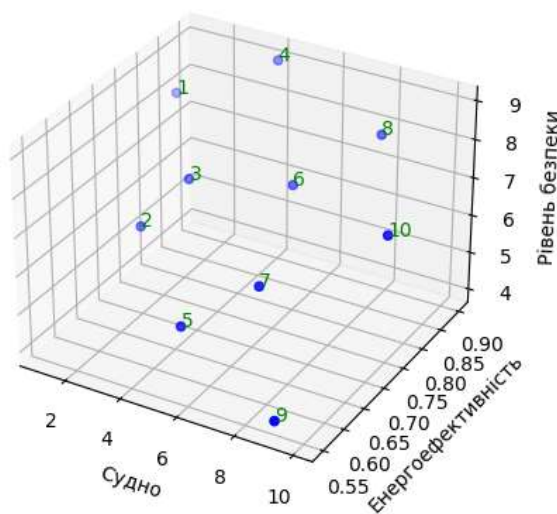


Рис. 2. Аналіз зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна

На основі поданого графіка, що демонструє взаємозв'язок між енергоефективністю і безпекою суден, можемо зробити такі висновки:

- спостерігається позитивна кореляція між енергоефективністю і безпекою судна, оскільки судна з вищими значеннями енергоефективності зазвичай мають більш високий рівень безпеки;

- судна з низькою енергоефективністю мають низький рівень безпеки. Це свідчить, що низька енергоефективність може бути пов'язана з недостатньою якістю проектування, обслуговування або іншими факторами, які

можуть мати негативний вплив при експлуатації судна на його безпеку;

- на графіку також можна помітити певний ступінь варіабельності безпеки за різних значень енергоефективності. Це вказує на те, що енергоефективність, хоч і важлива, не є єдиним визначальним фактором безпеки судна. Імовірно, інші фактори, такі як технічний стан судна або навченість екіпажу, також впливають на безпеку.

Крім того, поданий графік підтверджує можливість використання множинної регресії для моделювання та передбачення безпеки судна на основі значень енергоефективності та інших

незалежних змінних. Рівняння регресії дає змогу отримати чисельні значення безпеки з урахуванням вхідних даних.

Отже, аналіз зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна за допомогою запропонованого інструментарію дає змогу глибше зрозуміти і дослідити взаємозв'язок між цими параметрами та приймати поінформовані рішення в галузі проєктування, будівництва та безпечної експлуатації суден.

Висновки. Аналіз зв'язку між енергоефективністю і безпекою судна дає змогу отримати інформацію про вплив різних факторів на безпеку судна та використовувати цю модель для прогнозування безпеки нових суден на основі їхніх характеристик. Запропонована

модель множинної регресії може бути використана для прогнозування безпеки судна на основі значень незалежних змінних. Коефіцієнти регресії дають інформацію про внесок кожної незалежної змінної в модель, а метрики якості моделі допомагають оцінити її точність і придатність для використання.

Що важливо, ефективні методи навчання членів екіпажу використанню енергоефективних систем є невід'ємною складовою процесу забезпечення безпеки судна. Екіпаж повинен бути добре підготовлений і мати необхідні навички для правильного керування та моніторингу цих систем. Це допомагає запобігти помилкам в експлуатації і своєчасно реагувати на будь-які проблеми.

Список використаних джерел

1. Jon Min Hyok & Yu Chung (2023). Optimization of Ship Energy Efficiency Considering Navigational Environment and Safety. 10.1007/978-981-99-0373-3_1.
2. Li Junman & Hu Yaan & Wang Xin & Diao Mingjun (2023). Study on the Operation Safety Evaluation System of Ship Lock Combined with Variation Coefficient Method and Matter-Element Extension Method. 10.1007/978-981-19-6138-0_57.
3. Sogut M. & Ozkaynak Suleyman (2023). Energy Efficiency and Management Onboard Ships. 10.1007/978-981-99-1677-1_10.
4. Hasan S M & Karim Mashud (2022). Energy efficiency design index baselines for ships of Bangladesh based on verified ship data. Heliyon. 8. e10996. 10.1016/j.heliyon.2022.e10996.
5. Duan Minghua & Wang Yi & Fan Ailong & Yang Jian & Fan Xuelong (2023). Comprehensive analysis and evaluation of ship energy efficiency practices. Ocean & Coastal Management. 231. 106397. 10.1016/j.ocecoaman.2022.106397.
6. Tadros Mina & Ventura Manuel & Soares C. (2023). Review of the Decision Support Methods Used in Optimizing Ship Hulls towards Improving Energy Efficiency. Journal of Marine Science and Engineering. 11. 835. 10.3390/jmse11040835.
7. Wu Zhongyuan (2022). Configuration Generation Method of Ship End Program for Ship Energy Efficiency Management Platform. Wireless Communications and Mobile Computing. 2022. 1-7. 10.1155/2022/7742088.
8. Karatuğ Çağlar & Tadros Mina & Ventura Manuel & Guedes Soares Carlos (2023). Strategy for ship energy efficiency based on optimization model and data-driven approach. Ocean Engineering. 279. 114397. 10.1016/j.oceaneng.2023.114397.
9. Melnyk O., Ocheretna V., Shahov A. (2023). Intellectual capital is the foundation of innovative development: Conceptual principles of ensuring organizational and technological aspects of ship safety. Monographic series «European Science». Book 18. Part 1. 2023.

10. Melnyk O., Onyshchenko S. (2022). Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. ISEM 2021, LNNS 463. P. 1–9. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9.

Мельник Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна. ORCID: 0000-0001-9228-8459. E-mail: m.onmu@ukr.net.

Melnyk Oleksiy Mykolayovych, PhD (Eng.), Assoc. Prof. at Navigation and Maritime Safety Dept., Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine. ORCID: 0000-0001-9228-8459. E-mail: m.onmu@ukr.net.

Статтю прийнято 29.05.2023 р.

УДК 620.92

ОГЛЯД КОНФІГУРАЦІЙ І СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ НА ОСНОВІ СИЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
аспіранти Д. А. Гордієнко, А. В. Синявський, Д. А. Шелест

REVIEW OF CONFIGURATIONS AND STRATEGIES OF CONTROL OF MICRONETWORKS BASED ON POWER ELECTRONICS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko,
postgraduate A. V. Syniavskyi, postgraduate D. A. Shelest

Анотація. У статті наведено огляд конфігурацій мікромережі, параметрів, структур та методів керування для установок розподільних енергетичних ресурсів з електронним з'єднанням, що відрізняється більшою гнучкістю та надійністю. Розглянуто параметри в структурах блоків розподільних енергетичних ресурсів і топології силової електроніки. Описано схеми керування електронно з'єднаних агрегатів розподільних енергетичних ресурсів при різних режимах експлуатації. Представлено методи керування миттєвою активною і реактивною потужністю для мікромереж змінного струму.

Ключові слова: мікромережа, перетворювач електроенергії, розподілений енергетичний ресурс, розподілення навантаження, система керування.

Abstract. The growing implementation of distributed energy resources requires the development of the architecture of traditional electricity systems. With the growing deployment of distributed energy resources, especially for small combined heat and power plants and renewable energy sources based on distributed generation units, the architecture of the future power supply system must be transformed in order to carry out more complex operations. The article provides an overview of micronetwork configurations with greater flexibility and reliability, parameters, structures, and control methods for electronically connected distributed energy resource installations. Of the configurations considered, DC micronetwork and high-frequency AC

micronetwork have shown better performance for some special applications, such as low-voltage and geographically small networks. The corresponding parameters in the structures of the blocks of distribution energy resources and the topology of power electronics are considered. With the increase in the nominal capacity of distribution power resource units, multilevel converters provide effective ways to reduce cost and increase efficiency. Methods of controlling electronically connected aggregates of distribution energy resources under different operating modes are described. Under the influence of load and line impedance characteristics, different strategies of load distribution among units of distribution energy resources, control of instantaneous active and reactive power are compared. A multi-level hierarchical control architecture, micronetwork power and energy management is described. A comparison of control architectures based on centralized and distributed technology indicates that the modern micronetwork must become smart and flexible with the help of telecommunication infrastructures and the next generation of information technology.

Keywords: *micronetwork, electricity converter, distributed energy resource, load distribution, control system.*

Вступ. Схильний до лібералізації ринок електроенергії, наявність екологічних проблем щодо викидів парникових газів, стрімкий розвиток транспортних технологій, не надто висока енергоефективність джерел енергії – все це є найважливішими рушійними силами, спрямованими на поширення розподільних енергетичних ресурсів (РЕР) в системах електропостачання. Зі зростанням процесу розгортання РЕР, особливо щодо невеликих комбінованих теплоелектростанцій і відновлюваних джерел енергії на основі блоків розподіленої генерації, системи розподілення більше не можуть розглядатися як пасивні мережі. Вся архітектура майбутньої системи електропостачання має бути трансформована з метою здійснювати більш складні операції. Як наслідок, передбачаються можливі концептуальні моделі мікромережі [1, 2].

Концепція мікромереж з'єднує кількох клієнтів з декількома блоками РЕР, включаючи блоки розподіленої генерації. У контексті мікромережі, клієнти та блоки РЕР можуть не тільки працювати паралельно з основною мережею, але і вимагати також плавного переходу до навмисного або ненавмисного ізольованого режиму під час аномальних умов роботи мережі. На відміну від звичайних систем розподілення, така мережева структура має набагато більше гнучкості в керуванні

блоками РЕР, а отже, і потенційні переваги кращої якості електроенергії, більш надійної електрики та диспетчеризації, а також вищої потужності щодо ефективності постачання завдяки оптимальному розташуванню мікротеплоелектростанцій [3, 4].

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих в роботах [5, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження мікромереж і низка всесвітніх демонстраційних проєктів, таких як мікромережа CERTS у США, мікромережа Hydro-Quebec у Канаді, мікромережа NEDO в Японії та мікромережа EU в Європі продемонстрували проблеми та рішення в галузі мікромережі [7, 8]. Останнім часом технологія силової електроніки швидко розвивалася завдяки швидкій еволюції силових напівпровідників, які покращують перехідну характеристику силового каскаду, а цифрові сигнальні процесори можуть скоротити час обробки та збільшити складність алгоритмів керування. Широке використання силових електронних перетворювачів в блоках РЕР не тільки забезпечує економічно ефективні та гнучкі інтерфейси РЕР до мереж, але також дає змогу мікромережам ефективно контролювати та керувати потоками електроенергії [9, 10].

У мікромережі CERTS система «plug-and-play» вимагає, щоб усі блоки розподіленої генерації мали уніфіковану динамічну продуктивність незалежно від типу основного джерела енергії [11, 12]. Це означає, що модуль зберігання енергії з двонаправленим перетворювачем має бути включений у кожен блок розподіленої генерації.

Перетворювачі Z-джерела і закріплені нейтральною точкою багаторівневі перетворювачі пропонують альтернативний підхід, якого слід уникати лінійно-частотним трансформаторам [13, 14]. Безтрансформаторний перетворювач все ще є новою топологією для фотоелектричних систем, що забезпечує переваги високої ефективності, малі розміри і вагу, а також знижену вартість. Тим не менш, додатковий струм витоку з'являється через гальванічне з'єднання мережі та джерела постійного струму.

Тенденція системи відновлюваної енергетики має збільшити номінальну потужність (до кількох мегават). Щоб зменшити вартість і покращити ККД систем перетворення електроенергії, багаторівневий перетворювач пропонує вигідний варіант для високої потужності блоків PER з електронним з'єднанням. Крім закріпленої нейтральної точки і каскаду H-bridge багаторівневі перетворювачі, модульні багаторівневі конвертери також є перспективними топологіями [15, 16].

Характеристики навантажень і блоків PER визначають стабільність частоти та напруги в мікромережах [17, 18]. Хоча ряд схем контролю було запропоновано для паралельної роботи безперебійного живлення інверторів, їх застосування для розподілення навантаження у мікромережах слід додатково вивчати.

Отже, питання подальшого покращення енергоефективності електричних мікромереж є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є проведення

огляду конфігурацій і стратегії керування мікромережами на основі силової електроніки, що дасть змогу розробляти нові конфігурації мікромереж та робочі сценарії для деяких конкретних застосувань. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розглянути конфігурації мікромережі щодо форми передачі та розподілення електроенергії;

- дослідити різні структури силової електроніки інтерфейсних блоків розподільних енергетичних ресурсів в мікромережі змінного струму;

- проаналізувати схеми керування установками розподільних енергетичних ресурсів;

- представити методи керування миттєвою активною і реактивною потужністю для мікромереж змінного струму.

Основна частина дослідження. Конфігурації мікромереж.

Загальну конфігурацію силової електроніки на основі мікромереж наведено на рис. 1. Зазвичай мікромережа складається зі статичного перемикача, розподілених критичних та некритичних навантажень, кількох блоків PER з різними інтерфейсами силової електроніки, пристроїв захисту, а також приладів вимірювання, контролю і блоків керування.

Мікромережі поділяються на три категорії залежно від застосування [19]:

- комунальні мікромережі;
- промислові та комерційні мікромережі;
- віддалені мікромережі.

Однак останні досягнення в силовій електроніці та системи FACTS пропонують більше можливостей для конфігурації мікромережі з різними вимогами замовника.

Ще одна класифікація конфігурацій мікромережі може бути здійснена відповідно до способу, який використовується для передачі та розповсюдження електроенергії мікромережами:

– мікромережі постійного струму;
– мікромережі високочастотного змінного струму;

– мікромережі лінійно-частотного змінного струму;
– гібридні мікромережі постійного та змінного струму.

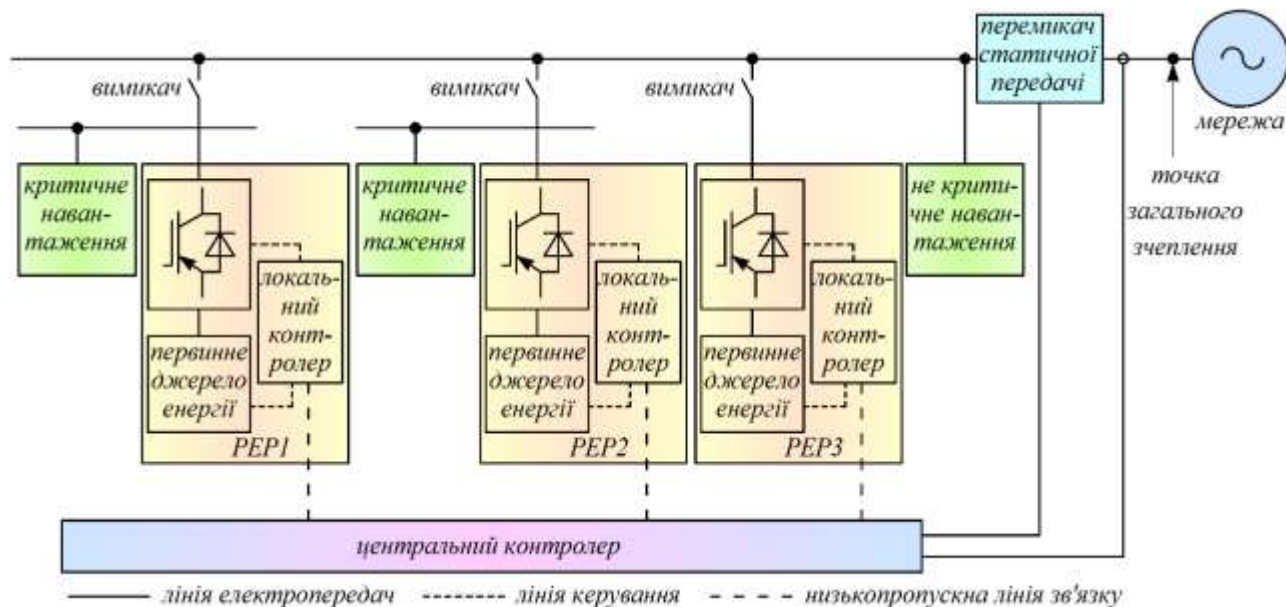


Рис. 1. Загальна конфігурація мікромережі на основі силової електроніки

Структури блоків РЕР з електронним зв'язком. Оскільки основні джерела енергії можуть виробляти постійну або змінну напругу, загальна структура РЕР з електронним з'єднанням поділяється на дві категорії. Для систем генерації вітрової турбіни, двигунів внутрішнього згорання і мікротурбін вихідною є змінна напруга, тоді як фотоелектричні системи, системи живлення на паливних елементах і системи акумуляторів виробляють постійну напругу. Вихідні напруги від енергоресурсів перетворюються за допомогою перетворювача силової електроніки до напруг, сумісних з мікромережею. Звідси тип вихідної напруги від основних джерел енергії визначає топології інтерфейсів силової електроніки. Крім того, очікуваний сценарій роботи мікромережі також накладає обмеження при виборі відповідної потужності та топології [20, 21].

На рис. 2 наведено систему накопичення енергії з вітровою турбіною, інтегровану з системою накопичення енергії батареєю. Двонаправлений перетворювач керує функціонуванням накопичувального агрегату на основі динаміки первинного джерела енергії. Використання накопичувальних елементів у колі постійного струму дає змогу покращити можливості проходження низької напруги.

Система керування інвертором від'єднана від випрямляча на стороні генератора. Разом із функціями для інвертора можна інтегрувати віртуальні моменти інерції. Отже, структури блоків РЕР з електронними зв'язками є не тільки визначальними типами основних джерел енергії, але також залежать від вимог до навантаження, структур мікромереж і пов'язаними з ними операційними сценаріями [22, 23].

На рис. 3 наведено базову конфігурацію одноступеневої системи перетворення електроенергії для фотоелектричної системи. Лінійно-частотний трансформатор зазвичай інтегрується в систему, коли необхідно

гальванічно розв'язати або забезпечити високий коефіцієнт перетворення напруги. Він має найпростішу структуру, на відміну від громіздкого та дорогого лінійного частотного трансформатора.

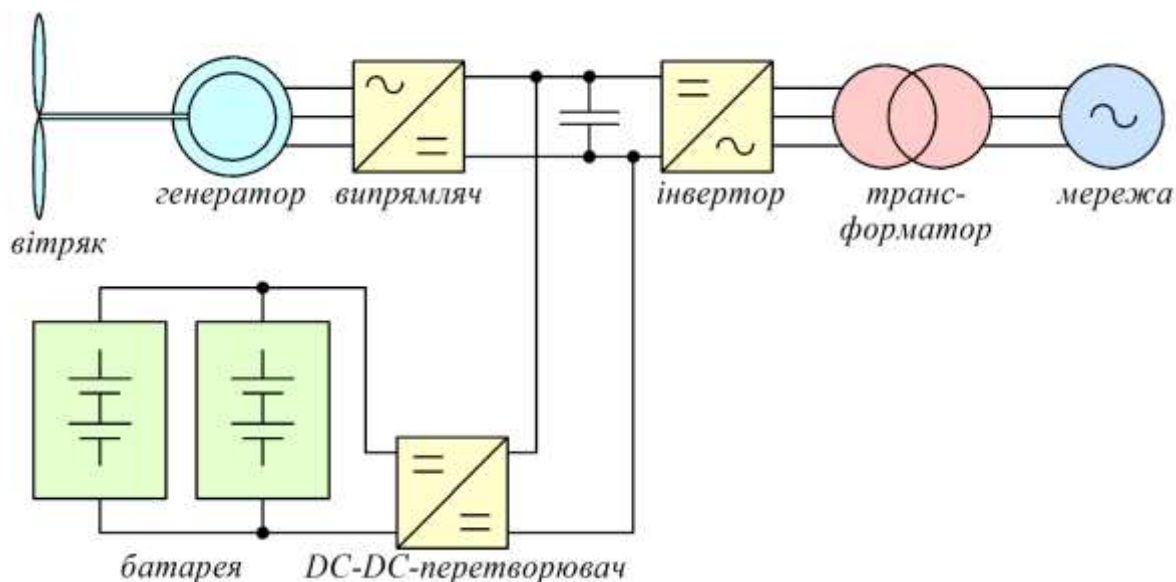


Рис. 2. Система вітрової турбіни з системою накопичення енергії батареєю

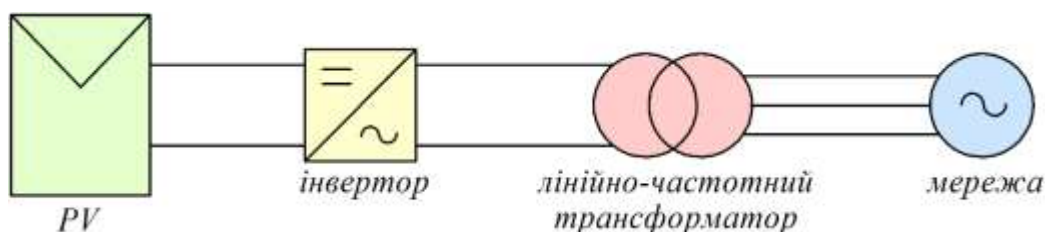


Рис. 3. Система перетворення електроенергії для фотоелектричної системи

Двоступеневі системи перетворення потужності є найпоширенішою конфігурацією для всіх електронно пов'язаних блоків ПЕР [24, 25]. На рис. 4 наведено дві типові структури двоступеневого перетворення електроенергії: система для фотоелектричних систем (PV) та система з паливним елементом (FC). Зазвичай

двоступенева система перетворення електроенергії складається з DC-DC-перетворювача для джерел енергії з вихідною напругою постійного струму, або AC-DC-перетворювача для джерел енергії з вихідною напругою змінного струму, а також із підключеним до мережі DC-AC-перетворювачем.

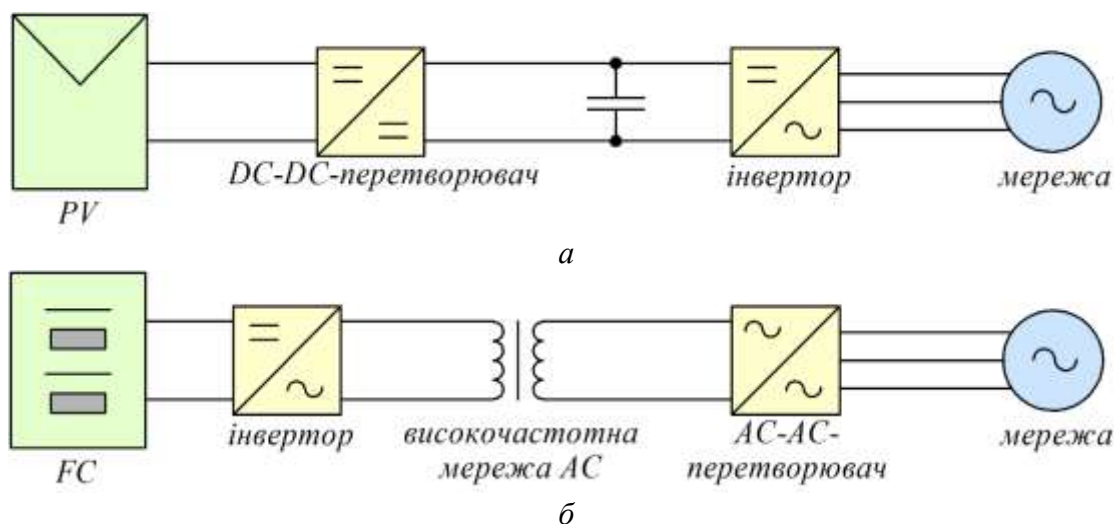


Рис. 4. Структури двоступеневих систем перетворення електроенергії для фотоелектричної системи (а) і системи з паливним елементом (б)

На рис. 4, а замість низькочастотного трансформатора в одноступеневій системі перетворення електроенергії використовується DC-DC-перетворювач для ізоляції та підвищення напруги. Іншою альтернативною топологією без низькочастотного трансформатора є високочастотний перетворювач лінії змінного струму, як наведено на рис. 4, б.

Методи керування блоками РЕР з електронним зв'язком. Методи контролю для установок РЕР розроблено на основі можливих умов експлуатації та бажаних функцій [26, 27]. Загальну систему керування для блоку РЕР з електронним зв'язком у мікромережі змінного струму, де блоки РЕР можуть працювати з електронним зв'язком як мережеутворювальні, мережеживильні та мережеопорні одиниці, наведено на рис. 5.

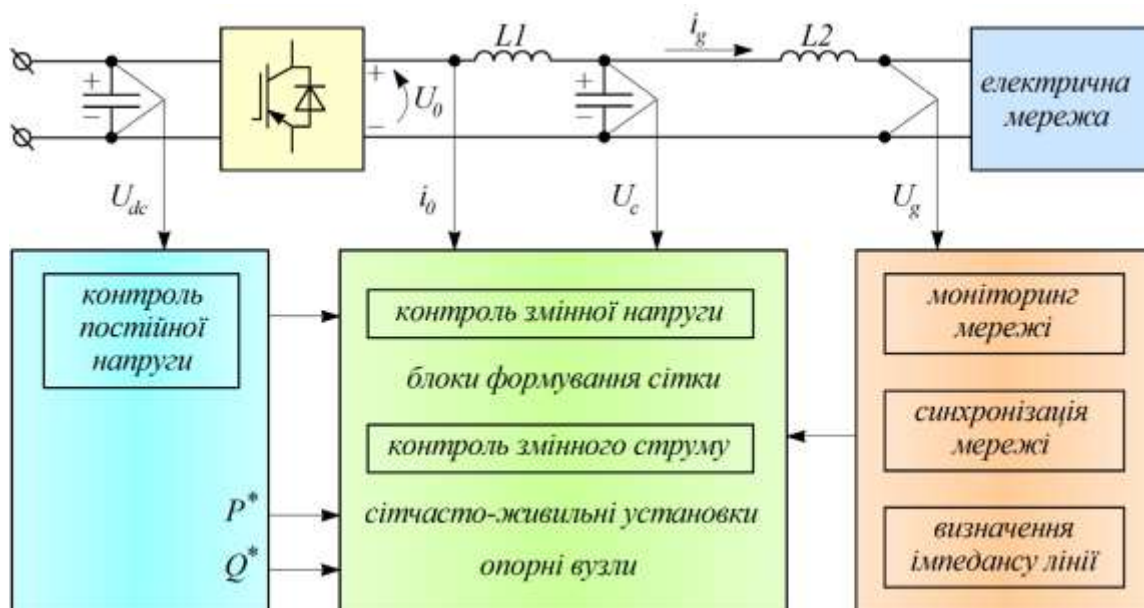


Рис. 5. Система керування блоком РЕР з електронним зв'язком всередині

Блоки формування мережі регулюють напругу та частоту системи за рахунок збалансування генеруючої потужності та потреб у навантаженні, коли мікромережа працює в ізольованому режимі [28]. Проте в такому режимі роботи є відхилення опорної напруги та частоти від основної мережі, блоки формування змінюються, щоб працювати як джерело струму. Отже, методи керування для блоків формування мережі мають забезпечувати плавність перехідних процесів у режимі роботи мікромережі.

Блоки живлення мережі регулюють наявні активні та реактивні навантаження з метою дотримання вимог до відправки електроенергії і для компенсації коливань навантаження та потоку потужності у фідері. Методи контролю можна класифікувати на три категорії залежно від використання регуляторів струму: керування струмом, пряме керування потужністю та керування змінною напругою.

Метод керування струмом можна представити як метод керування, орієнтований на напругу і метод віртуального керування потоком. Замість синхронізації з напругою мережі, метод віртуального керування потоком робить систему керування синхронізованою на інтервалі напруги, яку можна розглядати як відфільтровану напругу мережі. Метод прямого керування потужністю регулює миттєві активні і реактивні потужності. Через відсутність внутрішнього контуру регулювання струму в схемі прямого керування потужністю, перетворення координат та роз'єднання між активним і реактивним силовим компонентом не є необхідним. Опорні блоки мережі керуються не тільки, щоб отримати максимальну активну потужність з їхнього первинного джерела енергії, а також для надання допоміжних послуг для покращення якості.

Керування мікромережею та живленням. Керування мікромережею та живленням включає кілька проблем, які відрізняються від розподільних мереж

низької напруги блоків PER. Традиційні системи живлення зазвичай мають кінетичну енергію, що зберігається в роторах генератора, і вони розглядаються як необхідні для стабільності систем [29, 30]. В мікромережі на основі електроніки, навпаки, переважають блоки PER з електронним з'єднанням, за своєю суттю без інерції, але з можливістю більш гнучкої роботи. Ще одна проблема пов'язана з резистивним характером в розподільних мережах низької напруги, який призводить до зв'язку між активною потужністю та системною напругою, і, як наслідок, ускладнює керування потоками електроенергії та профілем напруги мікромережі. Крім того, очікується, що вся енергетична система в контексті мікромережі буде інтерактивною, розумною і розподіленою, тому необхідні передові архітектури для керування енергоспоживанням. На рис. 6 наведено загальну трирівневу ієрархічну систему керування мікромережею.

Подібно до ієрархічного керування для традиційної системи живлення, ієрархічні системи керування для мікромережі організовано у такий спосіб. Перший рівень контролю має справу з миттєвими балансами активної та реактивної потужності. Другий рівень контролю відновлює напругу та частоту системи відхилення після перехідних процесів і повторно синхронізується з основною мережею. Третій рівень контролю призначено для виконання довгострокових завдань енергоменеджменту. Пропускна спроможність системи контролю поступово знижується з початкового рівня до вищого рівня. Основні відмінності від ієрархій керування великими енергосистемами полягають в методах керування, які використовуються на кожному рівні. Особлива увага приділяється первинним елементам контролю одиниць PER для миттєвого балансу активної та реактивної потужності, а також архітектурам диспетчерського керування для тривалого терміну енергетичного менеджменту.

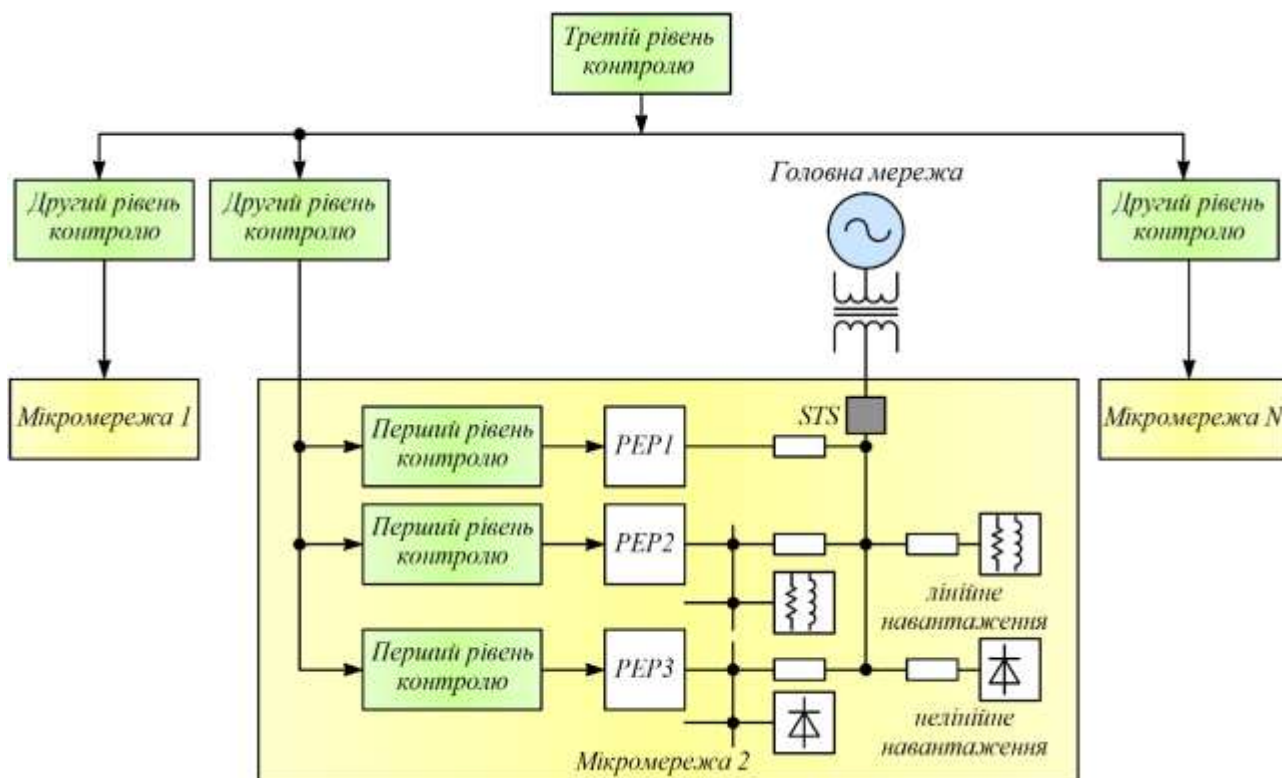


Рис. 6. Архітектура ієрархічної системи керування мікромережею

Характеристики навантаження мають значний вплив на такі характеристики мікромережі, як перехідна стабільність і стабільність напруги. Важливо добре розуміти характеристики навантаження та виконувати стратегії керування мікромережею. Моделювання навантаження здійснюється за рахунок

побудови фізичних моделей типових навантажень.

Відомо ряд моделей навантаження для аналізу стабільності системи. Такі моделі навантаження загалом класифікуються як статичні та динамічні моделі. Характеристики напруги статичного навантаження можна задати як

$$\begin{cases} P = P_n \cdot \left[a_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_p \right]; \\ Q = Q_n \cdot \left[a_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_q \right], \end{cases} \quad (1)$$

де U_n – номінальна напруга;

P_n і Q_n – активна і реактивна потужності навантаження при номінальній напрузі;

$a_p, b_p, C_p, a_q, b_q, C_q$ – коефіцієнти, що являють пропорцію різних видів навантажень.

Коефіцієнти мають відповідати таким умовам:

$$\begin{cases} a_p + b_p + C_p = 1; \\ a_q + b_q + C_q = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Частотну залежність характеристики навантаження також можна виразити за допомогою поліномів:

$$\begin{cases} P = P_n \cdot \left[a_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_p \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_p \right] \cdot (1 + K_{pf} \cdot \Delta f); \\ Q = Q_n \cdot \left[a_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + b_q \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + C_q \right] \cdot (1 + K_{qf} \cdot \Delta f), \end{cases} \quad (3)$$

де Δf – відхилення частоти від номінальної частоти f_0 .

Виходячи з виразів (1) і (3), вплив статичного навантаження напруги і частотних характеристик на продуктивність системи першого рівня контролю падіння показує, що залежності напруги і частоти навантажень вимагають, щоб блоки РЕР приймали характеристики спаду частоти активної потужності і реактивної напруги.

Миттєві баланси активної та реактивної потужностей в мікромережах переважно гарантуються миттєвим відстеженням за навантаженням та розподіленням навантаження між блоками РЕР. Оскільки тут основна увага приділяється основним стратегіям контролю для блоків РЕР, алгоритми скидання навантаження для миттєвого відстеження за навантаженням не мають бути залученими.

При використанні критичних комунікаційних зв'язків виділяють дві групи стратегій, доступних для миттєвого розподілення навантаження в мікромережах, включаючи методи розподілення активного навантаження (струму або потужності) і методи контролю падіння.

Метод розподілення активного навантаження (струму або потужності) включає підхід «головний-підлеглий» і керування обмеженням струму. У цьому

виді стратегій керування блок РЕР працює як мережоутворюючий (головний) блок, який регулює напругу системи і частоту, тоді як решта блоків РЕР (підлеглих) отримують поточні посилення через зв'язок з будь-якого провідного пристрою або попередньо веденого пристрою. Будь-який блок РЕР в мікромережах може бути головним. Використання критичних каналів зв'язку може добре працювати при паралельній роботі інверторів в межах одного обладнання, але накладає кілька проблем для розподілення навантаження в мікромережі. Найбільш очевидним недоліком є обмеженість смуги пропускання сигналу зв'язку, який призводить до того, що головний пристрій сприймає більшість нелінійних навантажень у мікромережі. Отже, спотворені потужності часто компенсуються локально самим блоком РЕР без використання каналів зв'язку в удосконаленому методі активного розподілення навантаження.

Метод контролю падіння заснований на відомій кореляції між частотою і потоками активної потужності в традиційних енергосистемах. За аналогією для генераторів змінного струму частота одиниці РЕР зменшується, коли додаткове навантаження збільшується, а також збільшується, коли є надлишок активної потужності в мікромережах. Замість використання

критичних каналів зв'язку, методи контролю падіння дають змогу блокам РЕР автоматично розподіляти загальне навантаження за рахунок вимірювання локально доступних змінних (вихідної напруги та струму), та забезпечує тим самим більш високу надійність і гнучкість.

Зазвичай методи контролю падіння можна додатково розділити на два типи, тобто «головний-підлеглий» і «мульти-головний» контроль падіння. Керування падінням «головний-підлеглий» представляється комбінованим використанням контролю головного-підлеглого і контролю падіння. Це доречно для випадку, якщо один або кілька блоків РЕР виступають у ролі мережоутворювального (головного) блоку, а решта блоків працюють як одиниці живлення мережі (підлегли). З іншого боку, в керуванні «мульти-головний», немає різниці між блоками формування мережі і блоками живлення мережі. Всі блоки РЕР працюють як мережоутворювальні одиниці.

Однак відомо, що існує кілька обмежень на використання звичайного методу контролю падіння $P-\omega$ і $Q-V$ мікромережі через характеристики розподільних ліній і навантажень. Для статичних характеристик мікромереж низький X/R коефіцієнт опору розподільної лінії впливає на точність розподілення навантаження. Крім того, є гармонічні та незбалансовані потужності, які погано компенсуються в появі нелінійних і незбалансованих навантажень. Для динамічної поведінки мікромереж під час вибору характеристик падіння для блоків РЕР необхідно враховувати залежності напруги та частоти навантажень, інакше контролери можуть не забезпечити належний спільний доступ і це призведе до нестабільності.

Щоб пом'якшити вищезазначені недоліки, можна використати вдосконалені варіації на основі характеристик падіння $P-\omega$ і $Q-V$. Перший метод являє нові характеристики спаду між різними частотними компонентами контрольованого

сигналу (змінна напруга) і активною потужністю (P), реактивною потужністю (Q) і потужністю спотворень (D) відповідно.

Отже, необхідно уникати використання характеристики падіння $Q-V$, і ефект імпедансу лінії усувається. Більше того, спотворення потужності, яке є результатом нелінійних і незбалансованих навантажень, компенсуються за допомогою характеристики падіння $D-\omega d$, де ωd – спадаюча компонента частоти, викликана потужністю спотворення. Однак поява високочастотних сигналів обмежує номінальну потужність блоків РЕР і збільшує спотворення напруги на виходах блоків РЕР.

Друга група методів заснована на віртуальному виведенні концепції імпедансу. Ці альтернативи приймають кілька контурів зворотного зв'язку керування, де віртуальний імпеданс емулюється за допомогою прямої петлі струму навантаження. На рис. 7 наведено блок-схему на основі віртуального імпедансу методу контролю падіння.

На відміну від послідовного імпедансу синхронного генератора, який здебільшого є індуктивним, вихідний опір блоків РЕР з електронним зв'язком може бути вибраний довільно, що забезпечує гнучкий спосіб боротьби з впливом лінійного імпедансу та характеристики навантаження. Вихідний опір складається з індуктивності та пропонується паралельне підключення навантаження для точного розподілення нелінійних навантажень. Він розроблений незалежно для представлення поведінки індуктивності навколо основної частоти та резистивного характеру для струмів низьких гармонік. Головним недоліком цього методу є підвищені гармонічні спотворення напруги на клемі блоків установок РЕР.

Можливим є використання схеми резистивної активної фільтрації блоків РЕР з електронним зв'язком для активної компенсації спотворених навантажень. На рис. 8 наведено блок-схему на основі методу резистивної активної фільтрації.

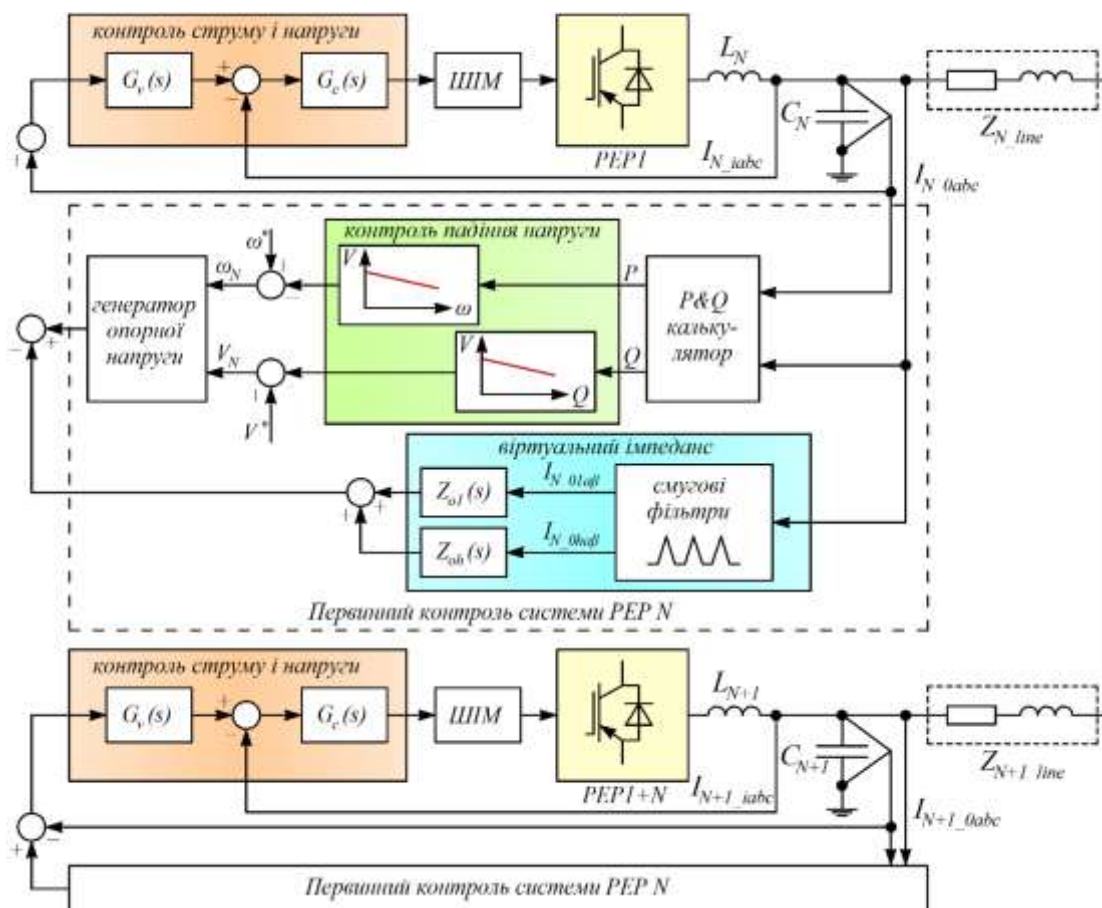


Рис. 7. Блок-схема методу контролю падіння на основі віртуального імпедансу

Порівняно зі схемою віртуального імпедансу, цей метод ефективно гасить гармонічні спотворення напруги на виході блоків PER, потрібен лише контур керування струмом з високою пропускнуною спроможністю, що спрощує внутрішню напругу та струм контуру керування. Однак продуктивність цього методу погіршується через невідповідність між гармоніками індуктивності і опору розподільної лінії.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– 3 розглянутих конфігурацій мікромереж кращу ефективність для деяких спеціальних застосувань, таких як низьковольтні і географічно невеликі мережі, мають мікромережі гібридного постійного та змінного струму, оскільки

забезпечують вигідну продуктивність для агрегатів розподільних енергетичних ресурсів;

– при дослідженні параметрів в структурах блоків розподільних енергетичних ресурсів і топології силової електроніки визначено, що зі збільшенням номінальної потужності блоків розподільних енергетичних ресурсів підвищується ефективність багаторівневих перетворювачів, що може бути дуже корисним для галузі транспортних технологій;

– 3 описаних схем керування електронно з'єднаних агрегатів розподільних енергетичних ресурсів при різних режимах експлуатації підхід багатоконтурного керування є перспективним рішенням для формування мережі;

– з представлених методів керування миттєвою активною і реактивною потужністю для мікромереж змінного струму найбільш ефективним є використання методу резистивної активної фільтрації блоків розподільних

енергетичних ресурсів з електронним зв'язком для активної компенсації спотворених навантажень, що ефективно гасить гармонічні спотворення напруги на виході блоків розподільних енергетичних ресурсів.

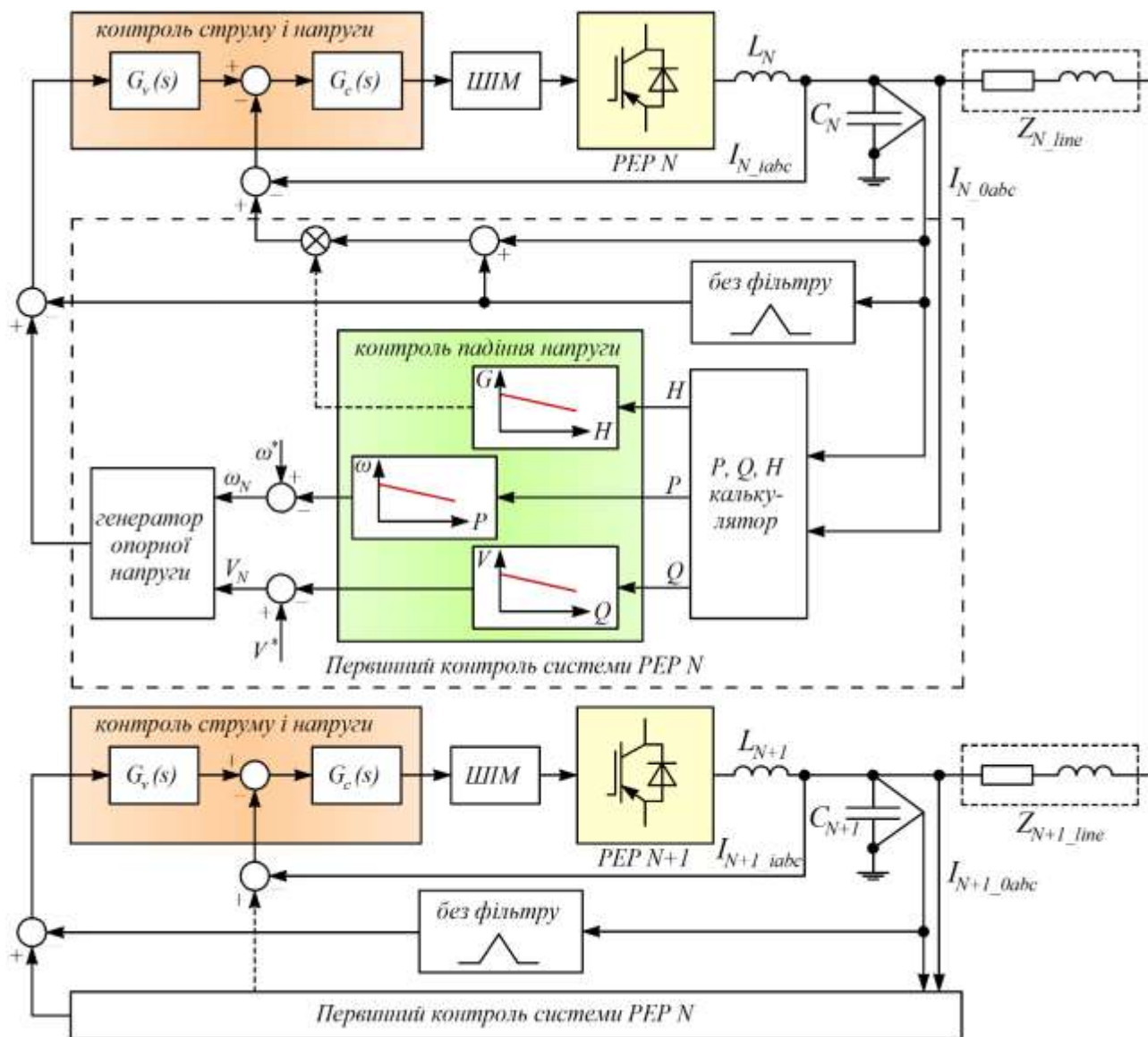


Рис. 8. Блок-схема методу контролю падіння на основі резистивної активної фільтрації

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Guerrero J. M., Blaabjerg F., Zhelev T., Hemmes K., Monmasson E., Jemei S., Comech M. P., Granadino R., Frau J. I. Distributed generation: Toward a new energy paradigm. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2010. Vol. 4, No. 1. P. 52–64.
2. Garg V. K., Sharma S. Overview on Microgrid System. *2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. 2018. P. 694–699. DOI: 10.1109/PDGC.2018.8745849.
3. Hernandez-Aramburo C., Green T., Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2005. Vol. 41, No. 3. P. 673–681.
4. Timbus, Liserre M., Teodorescu R., Rodriguez P., Blaabjerg F. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. Vol. 24, No. 3. P. 654–664.
5. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of Operating Modes and Features of Integration of Renewable Energy Sources into the Electric Power System. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
7. Lasseter R. Smart distribution: Coupled microgrids. *IEEE Proc.* 2011. Vol. 99, No. 6. P. 1074–1082.
8. Barnes M., Kondoh J., Asano H., Oyarzabal J., Venkataramanan G., Lasseter R., Hatziargyriou N., Green T. Real-world microgrids – an overview. *Proc. IEEE SoSE*. 2007. P. 1–8.
9. Chakraborty S., Weiss M. D., Simoes M. G. Distributed intelligent energy management system for a single-phase high-frequency ac microgrid. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007. Vol. 54, No. 1. P. 1–13.
10. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.
11. Lasseter R., Eto J., Schenkman B., Stevens J., Vollkommer H., Klapp D., Linton E., Hurtado H., Roy J. CERTS microgrid laboratory test bed. *IEEE Trans. Power Del.* 2011. Vol. 26, No. 1. P. 325–332.
12. Peng F. Z source inverter. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2003. Vol. 39, No. 2. P. 504–510.
13. Gonzalez R., Gubia E., Lopez J., Marroyo L. Transformerless single-phase multilevel-based photovoltaic inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. Vol. 55, No. 7. P. 2694–2702.
14. Maharjan L., Inoue S., Akagi H., Asakura J. State-of-charge (SOC) balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. Vol. 24, No. 6. P. 1628–1636.
15. Watson A., Dang H., Mondal G., Clare J., Wheeler P. Experimental implementation of a multilevel converter for power system integration. *IEEE ECCE*. 2009. P. 2232–2238.
16. Pai F. An improved utility interface for microturbine generation system with stand-alone operation capabilities. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2006. Vol. 53, No. 5. P. 1529–1537.
17. Kim H., Yu T., Choi S. Indirect current control algorithm for utility interactive inverters in distributed generation systems. *IEEE Trans. Power Electron.* 2008. Vol. 23, No. 3. P. 1342–1347.
18. Guerrero J. M., Huang L., Uceda J. Control of distributed uninterruptible power supply systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. Vol. 55, No. 8. P. 2845–2859.

19. Driesen J., Katiraei F. Design for distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Mag.* 2008. Vol. 6, No. 3. P. 30–40.
20. Nikkhajoei H., Lasseter R. Distributed generation interface to the CERTS microgrid. *IEEE Trans. Power Del.* 2009. Vol. 24, No. 3. P. 1598–1608.
21. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Improving the energy efficiency of traction power supply systems by means the implementation of alternative power sources. *26th International Scientific Conference Transport Means 2022*. 2022. Part I. P. 459–464.
22. Chen Z., Guerrero J. M., Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. Vol. 24, No. 8. P. 1859–1875.
23. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskyi A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. Issue 19, Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.
24. Inoue S., Akagi H. A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system. *IEEE Trans. Power Electron.* 2007. Vol. 22, No. 2. P. 535–542.
25. Song Y., Chung S., Enjeti P. A current-fed link direct DC/AC converter with active harmonic filter for fuel cell power systems. *IEEE IAS*. 2004. P. 123–128.
26. Tirumala R., Mohan N., Henze C. Seamless transfer of grid- connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes. *IEEE APEC*. 2002. P. 1081–1086.
27. Teodorescu R., Blaabjerg F. Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode. *IEEE Trans. Power Electron.* 2004. Vol. 19, No. 5. P. 1323–1332.
28. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrids management. *IEEE Power and Energy Mag.* 2008. Vol. 6, No. 3. P. 54–65.
29. Pogaku N., Prodanovic M., Green T. Modeling, analysis and testing of an inverter-based microgrid. *IEEE Trans. Power Electron.* 2007. Vol. 22, No. 2. P. 613–625.
30. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667. 2022.9926756.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Синявський Андрій Владиславович, аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9588-6737.

Шелест Дмитро Андрійович, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6095-658X.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Syniavskyi Andrii Vladyslavovych, postgraduate of Department of Transport Communications, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-9588-6737.

Shelest Dmytro Andriiovych, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Tel.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6095-658X.

Статтю прийнято 07.06.2023 р.

УДК 656.2: 621.3: 614.8

АНАЛІЗ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ З ЕЛЕКТРОННИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Кандидати техн. наук В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE RELIABILITY OF RAILWAY AUTOMATION SYSTEMS WITH ELECTRONIC COMPONENTS

PhD (Tech.), Docents V. M. Butenko, O. V. Golovko, S. G. Chub

Анотація. Випробування електронних виробів залізничної автоматики передбачає оцінювання показників їхньої функційної безпечності та надійності. Підтвердження цих показників здебільшого здійснюється розрахунковим методом. Для цього застосовується галузева методика [8]. У статті запропонований вихід з цього положення. Дослідниками, які використовують значення американського довідника, доводиться необхідність використовувати й максимально можливу кількість додаткових наведених там даних. Не всі такі дані можуть бути коректно застосовані в розрахунках вітчизняних розробників і дослідників. Тому проведений порівняльний аналіз розрахункових формул з певних, зазначених у статті, джерел. Визначені ідентичні параметри та певні розбіжності. Сформульовані висновки щодо адаптації співвідношень американського джерела до вітчизняних вимог.

Ключові слова: надійність, безпечність, комп'ютерна інженерія, електротехнічні елементи.

Abstract. Testing of electronic products of railway automation involves assessing the indicators of their functional safety and reliability. Reliability standards are very high. Confirmation of these indicators is mostly performed by the calculation method [8]. For this purpose, the branching technique is applied. The initial data for the calculations are the reference failure rates of the elements of the product under study. In the industry methodology, it is recommended to obtain these failure rates from the time directory, or other available sources. Directories of the late twentieth

century are not relevant today. Among the current reference books is MIL-HDBK-217 F. Military handbook. Reliability prediction of electronic equipment. 1991, published in the United States. This guide is used by the vast majority of domestic developers of railway automation products. However, there are certain methodological problems that hinder the use of the methods of the above document. In particular, the methods of the late twentieth century provide reference values of failure rates, which characterize the maximum load on the element. The actual calculated values of failure rates will be significantly lower than the maximum. The reference values of the failure rates, which are given in the American directory, reflect the minimum possible values. In this case, the actual calculated values of failure rates will be significantly higher than the reference. It is obvious that the joint use of the railway industry methodology and the American reference data on failure rates is not correct. In addition, the American method operates with more parameters. A way out of this situation is proposed. If the researcher uses the American value, he is obliged to use as much additional data as possible. Not all such data can be correctly used in the calculations of domestic developers and researchers. Therefore, a comparative analysis of the calculation formulas from the two above sources. Identical parameters and certain differences are indicated. Conclusions are made on the adaptation of the ratio of the American source to domestic requirements.

Keywords: reliability, safety, computer engineering, electrical components.

Вступ. Загальні питання сучасної теорії інформації в розрізі термінології та основ побудови систем автоматизації описані в роботі [1, с. 8], розглянуті елементи інформаційно-вимірювальних компонентів систем автоматики без особливої уваги до питань надійності та безпечності. У роботі [2, с. 7] аналізується взаємозв'язок між надійністю і безпечністю спеціалізованих комп'ютерних систем залізничної автоматики з ретельним аналізом як апаратних, так і програмних заходів підвищення безпечності компонентів і систем. Основна увага приділяється аналізу методів і засобів досягнення заданого рівня безпечності сучасних систем залізничної автоматики з електронними компонентами. У свою чергу в роботі [3, с. 1] детально характеризується сигнальна система і технічні принципи функціонування сигналізації на європейській мережі залізничних перевезень TVG. Однак зовсім не визначаються показники надійності та безпечності компонентів, що забезпечують таку систему сигналізації. Взаємозв'язок між стандартами CENELEC у галузі залізничного транспорту та іншими нормативними документами з безпеки ретельно проаналізовано в роботі [4, с. 1].

Такий ретельний аналіз ілюструє динаміку частини мір цільових показників нормативного забезпечення ЄС. Однак протиріччя в нормативному забезпеченні Україні слід проаналізувати далі.

Постановка проблеми. Частина підприємств України, що виробляє компоненти залізничної автоматики з електронними елементами, користується тільки методикою доведення функційної безпечності. Отже, слід встановити, чи достатньо тільки зазначеної методики для доведення функційної безпечності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Детерміновані моделі складних систем залізничної автоматики ретельно розглядалися на прикладі основних станційних підсистем залізничної автоматики в роботі [5, с. 185]. У свою чергу проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів на прикладі електронних реле розглянуті в роботі [6, с. 31]. Однак технічне переоснащення вітчизняної залізниці, у т. ч. впровадження нових розподілених засобів і систем залізничної автоматики, на сьогодні є одним з важливих напрямів розвитку систем керування залізничною галуззю. Випробування електронних виробів залізничної автоматики (ЗА), зокрема

пристроїв, безпосередньо пов'язаних з регулюванням руху потягів, передбачає оцінювання показників їхньої функційної безпечності та надійності (ФБІН) [7, с. 2]. Норми ФБІН [7, с. 11] є дуже високими, тому підтвердження цих показників здебільшого здійснюється розрахунковим методом. Для цього застосовується відповідна галузева методика [8, с. 13-52]. Вихідними даними для розрахунків є довідникові інтенсивності відмов елементів λ досліджуваного виробу для пуасонівського потоку кількості відмов. У роботі [8, с. 14] ці інтенсивності відмов рекомендовано отримувати з довідника [9, с. 101-120]. Однак там містяться не всі елементи, застосовувані розробниками. У цьому випадку в роботі [8, с. 14] рекомендується застосовувати показники надійності з інших доступних довідників.

Одним з таких довідників серед найбільш поширених, що охоплюють значну кількість різноманітних сучасних електрорадіоелементів, є довідник [10, с. 3-23], яким користується переважна більшість вітчизняних розробників ЗА, зокрема ПП «СЦБ ГРУП» і ТОВ «НВП «Трансавтоматика» при проектуванні та виробництві різноманітних колійних кодових трансмітерів, електронних реле, а також інших пристроїв СЦБ. Однак існують певні методологічні проблеми, що стримують користування методиками [10, с. 3-23]. Зокрема, у роботі [9, с. 101-120] наведені довідкові значення λ , що характеризують номінальне (максимальне) навантаження на елемент. Реальний коефіцієнт навантаження, який розраховується відповідно до рекомендацій [9, с. 89], є, як правило, меншим. Тому фактичні значення λ , що враховують розраховане навантаження на елемент, також будуть меншими. Довідкові ж значення λ , наведені в довіднику [10, с. 5-23], відображують мінімально можливе значення, що після проведення розрахунків підвищується через застосування обов'язкових додаткових даних. Якщо ж

узяти довідкові номінальні значення λ з довідника [10, с. 5-23] і застосувати методику розрахунку загальної інтенсивності відмови досліджуваного пристрою, рекомендовану роботою [9, с. 85-98], то отриманий результат буде дуже (на декілька порядків) викривленим – хибно суттєво кращим. Крім того, методика [10, с. 5-23] оперує більшою кількістю параметрів, які обов'язково треба враховувати, ніж кількість параметрів у роботі [8, с. 13-52].

Вихід з цього може бути таким. Якщо дослідник використовує значення λ з довідника [10, с. 3-23], він зобов'язаний використовувати й максимально можливу кількість додаткових наведених там даних. Складність такого підходу полягає в тому, що довідник [10, с. 3-23] є документом США, що враховує їхні технічні особливості, зокрема особливості елементів мілітарі-застосування. Не всі такі дані можуть бути коректно застосовані в розрахунках вітчизняних розробників і дослідників. Тому необхідно детально проаналізувати довідник [10, с. 5-23], адаптувавши цей безумовно корисний документ до вітчизняних вимог.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. До переліку елементів, дані яких наведені в роботі [8, с. 13-52], входять:

- мікросхеми (біполярні, МОН – цифрові та лінійні, ПЛМ, мікропроцесори);
- дискретні компоненти (діоди, транзистори, оптоелектронні вироби);
- резистори, конденсатори, вироби, що містять індуктивність;
- електричні машини;
- реле, перемикачі, комутаційні вироби, запобіжники, кварцові резонатори, фільтри, а також деякі інші елементи (вакуумні прилади, лазери) і т. ін.

Формулювання цілей. Проведемо порівняльний аналіз кількості та якості даних, використовуваних у роботах [8, с. 13-52] і [10, с. 5-23] для розрахунку інтенсивності відмов деяких елементів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розрахункова інтенсивність відмов мікросхем [8, с. 14]

$$\lambda_e = \lambda_{0i} K_e K_m K_n,$$

де λ_{0i} – інтенсивність відмов мікросхеми i при температурі 25 °C і номінальному електричному навантаженні;

K_e – коефіцієнт, що враховує умови експлуатації (2,5 для елементів рухомого складу, 2,0 для іншого застосування);

K_n – коефіцієнт навантаження, що є відношенням навантажених виходів мікросхеми до «коефіцієнта розгалуження по виходу» (очевидно, слід розуміти повну кількість виходів).

Розрахункова інтенсивність λ_p відмов мікросхем [10, с. 5], відмов/год,

$$\lambda_p = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L 10^{-6},$$

де C_1 залежить від кількості елементарних вентилів у досліджуваному кристалі;

π_T залежить від температури кристалу;

C_2 залежить від особливостей конструкції мікросхеми (тип і кількість контактів, тип корпусу і т. ін.);

π_E є характеристикою навколишнього середовища;

π_Q залежить від категорії виконання мікросхеми (за нормами стандартів США);

π_L характеризує ступінь відпрацювання виробу в промисловості (кількість років з початку виробництва досліджуваної мікросхеми).

Значення λ_p надані для достатньо широкого переліку температур.

C_1 для мікропроцесорів залежить від особливостей топології (біполярна або МОН).

Надалі можна зробити певні висновки:

- кількість даних, врахованих у довіднику [10, с. 5], є суттєво більшою, ніж у роботі [8, с. 14];

- у роботі [8, с. 14] не врахований суттєвий перелік параметрів, яким оперує довідник [10, с. 5], – складність мікросхеми (кількість елементарних вентилів), температура кристала, конструктивні особливості мікросхеми (тип корпусу, кількість виводів), категорія виконання, відпрацьованість виробу в промисловості, різновид топології.

Отже, можна зробити висновок про можливість впровадження зазначених вище параметрів у вітчизняну практику: практично всі параметри можна застосовувати (окрім π_Q , π_L). Застосування цих двох параметрів є також можливим, але дещо ускладненим. При цьому слід рекомендувати впровадження добре зарекомендованих виробів, що вироблялися тривалий час, а π_Q застосовувати для більш простих категорій виконання.

Розрахункова інтенсивність відмов діодів і діодних збірок [8, с. 15] вираховується за такою формулою:

$$\lambda_e = \lambda_{0i} K_p K_\phi K_{d.n} K_{zi} K_e,$$

де K_p – коефіцієнт режиму, що залежить від електричного навантаження і температури;

K_ϕ – коефіцієнт, що враховує функціональний режим приладу (лінійний, перемикальний, випрямний та ін.);

$K_{d.n}$ – коефіцієнт, що залежить від величини максимально допустимого за технічними умовами (ТУ) навантаження за потужністю розсіювання (струму);

K_{zi} – коефіцієнт, що залежить від величини відношення робочої напруги до максимально допустимої напруги, за ТУ;

K_e – коефіцієнт, що залежить від умов експлуатації.

Розрахункова інтенсивність відмов низькочастотних діодів λ_p [10, с. 6], відмов/год,

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

де λ_b – базова частота відмов;

π_T – робоча температура виробу;

π_S – коефіцієнт електричного навантаження;

π_C – особливості конструкції контактів (виводів);

π_Q – особливості конструкції корпусу (матеріал, виконання і т. ін.);

π_E – особливості навколишнього середовища.

Щодо діодів інших типів, крім низькочастотних, то в довіднику [10, с. 6] наведені спеціальні співвідношення.

Висновки:

- $K_p, K_\phi, K_{\partial.н}, K_{zi}, K_e$ насправді зводяться до одного – навантаження [8, с. 15];
- у довіднику [10, с. 2-6] наведені таблиці для всіх застосовуваних коефіцієнтів, у роботі [8, с. 15] вони відсутні (стосується всіх типів виробів);
- у роботі [8, с. 15] не враховані такі чинники, як конструкція приладу (корпус, виводи), якість його виконання;
- у роботі [8, с. 15] не виділені відомості про робочу частоту діодів. Останнє співвідношення пропонується застосовувати як до низькочастотних виробів, так і високочастотних (див. нижче альтернативні співвідношення [10, с. 6] для високочастотних діодів).

Розрахункова інтенсивність відмов високочастотних діодів λ_p [10, с. 4], відмов/год,

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

де π_A – чинник особливостей застосування виробів (варактори, помножувачі, керування напругою, інші застосування);

π_R – коефіцієнт, що враховує потужність виробу.

Зазначені специфічні коефіцієнти можуть бути отримані та застосовані повною мірою.

Розрахункова інтенсивність відмов біполярних транзисторів λ_e [8, с. 15]

$$\lambda_p = \lambda_{0i} K_p K_{\partial.н} K_{zi} K_e,$$

де K_p – коефіцієнт режиму (електричне навантаження, температура);

$K_{\partial.н}$ залежить від величини максимально допустимого за ТУ навантаження (потужність, струм);

K_{zi} залежить від відношення робочої напруги до максимально допустимої напруги;

K_e залежить від умов експлуатації.

Для польових транзисторів вводиться коефіцієнт K_ϕ , що враховує режим роботи приладу (лінійний, перемикальний і т. ін.).

Для тиристорів пропонується не користуватися коефіцієнтом K_{zi} .

Розрахункова інтенсивність відмов біполярних низькочастотних транзисторів малої потужності [10, с. 6]

$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_Q \pi_E 10^{-6}$, відмов/год, містить усі коефіцієнти, розглянуті вище для діодів, і не містить нових складових.

Висновки про розбіжності між методиками [8, с. 15] і [10, с. 6] є аналогічними висновкам, наведеним вище щодо діодів. Крім того, у довіднику [10, с. 6-16] транзистори класифіковані суттєво більш детально (наведено нижче).

Розрахункова інтенсивність відмов біполярних високочастотних транзисторів малої потужності та тиристорів [10, с. 6-10]

$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_R \pi_S \pi_Q \pi_E 10^{-6}$, відмов/год, аналогічно містить усі коефіцієнти, розглянуті вище для діодів, і не містить нових складових.

Розрахункова інтенсивність відмов біполярних височастотних транзисторів великої потужності та польових (FET) височастотних транзисторів

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_M \pi_Q \pi_E 10^{-6}, \quad \text{відмов/год,}$$

аналогічно містить додатковий коефіцієнт π_M , що характеризує відповідність застосування приладу (вхідний, вихідний, інший).

Розрахункова інтенсивність відмов оптоелектронних приладів [10, с. 6-20]

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E 10^{-6}, \quad \text{відмов/год,}$$

аналогічно містить усі коефіцієнти, розглянуті вище, і не містить нових складових. У роботі [8, с. 16] формули для цих приладів не наводяться.

Розрахункова інтенсивність відмов резисторів λ_e [8, с. 17]

$$\lambda_p = \lambda_{0i} K_r K_m K_p K_e,$$

де K_r – коефіцієнт, що залежить від величини номінального опору;

K_m залежить від величини номінальної потужності.

Інші коефіцієнти були зазначені вище.

Розрахункова інтенсивність відмов [10, с. 9] постійних композитних, плівкових і дровових резисторів незалежно від їхньої потужності $\lambda_p = \lambda_b \pi_R \pi_Q \pi_E 10^{-6}$, відмов/год, аналогічно містить коефіцієнт π_R , значення якого відрізняється від коефіцієнта з аналогічним позначенням для діодів. Значення цього коефіцієнта залежить від номіналу резистора. Формула інтенсивності відмов для термісторів відрізняється відсутністю π_R .

Як проміжний висновок слід визнати, що в роботі [8, с. 17] не враховані особливості конструкції резистора. Крім того, там же не наведені дані про змінні резистори (щодо довідника [10, с. 9-13], то дані наведені нижче).

Інтенсивність відмов змінних дровових і бездротових резисторів містить більше складових:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{TAPS} \pi_R \pi_V \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

де π_{TAPS} – так званий TAPS чинник (кількість виводів);

π_V – коефіцієнт навантаження напругою.

Для точних резисторів додатково вводиться коефіцієнт π_C , що враховує особливості конструкції резистора.

Розрахункова інтенсивність відмов конденсаторів λ_e [8, с. 17]

$$\lambda_p = \lambda_{0i} K_c K_p K_e,$$

де K_c – коефіцієнт, що залежить від величини номінальної ємності.

Розрахункова інтенсивність відмов неелектролітичних конденсаторів усіх типів та електролітичних конденсаторів з нетвердим електролітом [10, с. 10], відмов/год,

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{CV} \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

де π_{CV} залежить від номіналу конденсатора.

Для електролітичних конденсаторів з твердим електролітом вводиться додатковий коефіцієнт π_{CR} , що залежить від відношення внутрішнього омичного опору конденсатора до його робочої напруги. Для змінних керамічних конденсаторів та індуктивних виробів, у т. ч. трансформаторів,

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

відмов/год.

Наступним проміжним висновком зазначимо, що в роботах [8, с. 17] і [10, с. 10] формули є приблизно ідентичними. Однак у

довіднику [10, с. 10] конденсатори класифіковані більш детально.

Розрахункова інтенсивність відмов обертових машин [10, с. 12] визначається за відношенням, відмов/год,

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_S \pi_N \pi_E 10^{-6},$$

де π_S залежить від розміру машини;

π_N залежить від кількості щіток статора машини.

У роботі [8] ця позиція не нормується й не наводиться.

Розрахункова інтенсивність відмов електромеханічних реле [10, с. 13] розраховується за формулою, відмов/год,

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_L \pi_C \pi_{CUC} \pi_F \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

де π_L залежить від ступеня та особливостей навантаження;

π_C залежить від кількості активних контактів, що проводять струм;

π_{CUC} залежить від кількості циклів спрацювань за годину;

π_F залежить від особливостей конструкції та застосування;

π_Q залежить від якості виконання реле;

π_E залежить від особливостей навколишнього середовища.

У роботі [8] ця позиція не наводиться.

Розрахункова інтенсивність відмов перемикачів і тумблерів λ_e [8, с. 7]

$$\lambda_p = \lambda_{0i} K_p K_{kk} K_e,$$

де K_{kk} – коефіцієнт, що залежить від кількості задіяних контактів.

Розрахункова інтенсивність відмов комутувальних приладів [10, с. 14] (перемикачі, тумблери, кнопки)

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_L \pi_C \pi_{CUC} \pi_E 10^{-6}, \text{ відмов/год. Для}$$

перемикачів обертового типу коефіцієнт π_C не застосовується.

Розрахункова інтенсивність відмов вимикачів

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_C \pi_U \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

відмов/год. Специфічними коефіцієнтами є:

π_C – залежить від конфігурації вимикача (кількість і тип контактів);

π_U – чинник застосування (розрив «сухих» або навантажених контактів).

Проміжний висновок – у роботі [8, с. 17] не врахований параметр «кількість задіяних контактів».

Розрахункова інтенсивність відмов з'єднувачів [10, с. 5]

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_C \pi_U \pi_Q \pi_E 10^{-6},$$

відмов/год. Специфічними коефіцієнтами є:

π_K – залежить від інтенсивності використання (кількість циклів виймання/вставляння за певний проміжок часу – 1000 год);

π_P – чинник навантаження (кількість задіяних активних контактів).

У роботі [8, с. 7] ця позиція не наводиться.

Розрахункова інтенсивність відмов вимірювальних приладів [10, с. 5]

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_A \pi_F \pi_Q \pi_E 10^{-6}, \text{ відмов/год.}$$

Специфічними коефіцієнтами є:

π_A – залежить від особливості використання (основні або резервні ланцюги);

π_P – чинник функціонального призначення приладу (амперметр, вольтметр тощо).

У роботі [8, с. 7] ця позиція не наводиться.

Розрахункова інтенсивність відмов кварцових резонаторів [10, с. 19]

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_Q \pi_E 10^{-6}, \text{ відмов/год, специфічні}$$

коефіцієнти відсутні.

Розрахункова інтенсивність відмов ламп розжарювання описується виразом

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_U \pi_A \pi_E 10^{-6}, \text{ відмов/год.}$$

Специфічним коефіцієнтом є π_U , що залежить від терміну придатності лампи.

У роботі [8] ця позиція не наводиться.

Розрахункова інтенсивність відмов електронних фільтрів, що не налаштовуються [10, с. 21], $\lambda_p = \lambda_b \pi_Q \pi_E 10^{-6}$, відмов/год, залежить тільки від якості фільтра та умов зовнішнього середовища.

У роботі [8] ця позиція не наводиться.

Розрахункова інтенсивність відмов запобіжників λ_e [8, с. 18]

$$\lambda_p = \lambda_{0i} K_i K_e,$$

де K_r – коефіцієнт, що залежить від величини номінального опору;

K_t – залежить від температури навколишнього середовища.

Розрахункова інтенсивність відмов запобіжників [10, с. 22] $\lambda_p = \lambda_b \pi_E 10^{-6}$, відмов/год, залежить тільки від умов навколишнього середовища. Слід зауважити, що запобіжник не розсіює суттєву потужність, але може приймати температуру навколишнього середовища. Тому його температурний режим доцільно визначати саме через температуру навколишнього середовища.

Розрахункова інтенсивність відмов трансформаторів і дроселів λ_e [8, с. 18]

$$\lambda_e = \lambda_0 \frac{K_i}{K_{i,cr}} K_e,$$

де K_i і $K_{i,cr}$ – коефіцієнти, що відповідають температурі навколишнього середовища і середній температурі експлуатації трансформаторів 50 °С.

Розрахункова інтенсивність відмов індуктивних приладів [10, с. 11] $\lambda_p = \lambda_b \pi_Q \pi_E 10^{-6}$, відмов/год. Коефіцієнт π_Q враховує тип і умови роботи приладу

(імпульсні кола, аудіо, кола великої потужності і т. ін.). Це не враховано в роботі [8].

Треба зауважити, що наведені вище дані та співвідношення не вичерпують наведене в довіднику [10, с. 5-23].

Висновки з дослідження і перспективи. Дослідженням встановлено, що довідник [10] є цілісним документом, скориставшись яким, можна розрахувати інтенсивність відмов широкого класу електронних та електромеханічних пристроїв, на відміну від якого, методика [8, с. 13-52] не є цілісною, практичне використання пов'язане з певними проблемами. По-перше, у методиці [8, с. 14-18] наведений достатньо обмежений перелік пристроїв і їхніх різновидів.

По-друге, методика [8, с. 13-52], на відміну від довідника [10, с. 5-23], фактично не містить конкретних цифрових даних про інтенсивності відмов і додаткові коефіцієнти. Там пропонується брати ці дані з довідника [8, с. 3–185]. Цей довідник не є розповсюдженим, видавався за часів СРСР (1989 р.) і містить статистичні дані про радянські електрорадіоелементи, що виготовлялися та застосовувалися радянською промисловістю до 1989 р. Такі елементи вже досить давно не використовуються сучасними розробниками та виробниками.

По-третє, не достатньо тільки зазначеної методики [8] для доведення функційної безпечності будь-якого типу електротехнічного обладнання залізничної автоматики, у тому числі й з електронними компонентами.

Щодо висновків та пропозицій.

1. Методики, наведені в довіднику [10], є цілком придатними для практичного використання в розрахунках показників надійності ЗА.

2. Статистичні дані, наведені в довіднику [10], є достатньо повними та охоплюють відмови всіх розповсюджених електрорадіоелементів ЗА.

3. Статистичні дані, наведені в довіднику [10], охоплюють відмови електрорадіоелементів різноманітного виконання, починаючи з мілітарного, включно з промисловим і побутовим.

4. Методику [8] доцільно відкорегувати з урахуванням інформації довідника [10].

Певним кроком вперед у вирішенні зазначених вище питань є використання норм і правил, що містять стандарти серії ДСТУ EN 61508, що охоплюють достатньо повний перелік різних питань, пов'язаних з функційною безпекою ЗА на всіх етапах їхнього життєвого циклу.

Список використаних джерел

1. Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація): навч. посіб. / П. Д. Стухляк, О. В. Іванченко, А. В. Букетов, М. А. Долгов. Херсон: Айлант, 2011. 371 с.
2. Мойсеєнко В. І., Бутенко В. М. Безпечність спеціалізованих комп'ютерних систем: навч. посіб. Харків: УкрДУЗТ, 2021. 112 с.
3. The TGV Signaling System. URL: <http://www.railfaneurope.net/tgv/signals.html>.
4. Брабанд Й., Хирао Ю., Людеке Дж. Ф. Взаимосвязь между стандартами CENELEC в области железнодорожной сигнализации и другими стандартами по безопасности. *Информационная безопасность на транспорте*. 2012. URL: <http://www.ibtrans.ru/upload/iblock/252/25224179d2f031147bf4a113e91b4411.pdf>. Загл. с экрана (дата звернення 26.01.2022).
5. Moiseenko V., Kameniev O., Butenko V., Gaievskiy V. Determination model of the apparatus state for railway automatics with restrictive statistical data. *Procedia Comput. Sci.* 149, 185–194 (2019). ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018).
6. Проблеми випробувань комплексів технічних засобів керування та регулювання руху поїздів /В. І. Мойсеєнко, В. М. Бутенко, О. В. Головка, С. Г. Чуб. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 3. С. 31 – 38. ISSN: 2413-3833.
7. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробування. Каталог нормативних документів. Київ: *Держспоживстандарт України*, 2003. DSTU 4178-2003. 73 с.
8. Методика доказу функційної безпечності мікроелектронних комплексів систем керування та регулювання руху поїздів /Міністерство транспорту України; Державна адміністрація залізничного транспорту України. Київ, 2002. 16 с.
9. Надежность изделий электронной техники для устройств народного хозяйственного назначения. Справочник /Всесоюзный научно-исследовательский институт «Электростандарт». Москва, 1989. 188 с.
10. MIL-HDBK-217 F. Military handbook. *Reliability prediction of electronic equipment*. 1991.

Бутенко Володимир Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9958-3960>. Тел.: (057) 730-10-62. E-mail: butenko@kart.edu.ua.

Головка Олександра Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки і систем управління, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9880-428X>. Тел.: (057) 730-10-40. E-mail: golovko@kart.edu.ua.

Чуб Сергій Григорович, кандидат технічних наук, доцент, інженер державного випробувального центру з оцінки відповідності продукції ДП «Харківстандартметрологія». ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4375-4676>. Тел.: 066-227-8666. E-mail: chub.3.6.49@gmail.com.

Butenko Volodymyr Associate professor, PhD technical sciences, department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9958-3960>. E-mail: butenko@kart.edu.ua.

Golovko Oleksandra Associate professor, PhD technical sciences, department of Computer Engineering and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9880-428X>. E-mail: golovko@kart.edu.ua.

Chub Sergij Associate professor, PhD technical sciences, engineer of the state testing center for evaluating the conformity of products of SE «Kharkivstandardmetrologiya». ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4375-4676>. E-mail: chub.3.6.49@gmail.com.

Статтю прийнято 13.06.2023

UDC 621.314

INCREASING THE ENERGY INDICATORS OF CONVERTERS OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, асп. Д. А. Гордієнко

Abstract. *The article presents the results of the research of semiconductor converters of charging stations for electric vehicles based on lithium-ion cells. Basic energy parameters and charge-discharge characteristics of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries are given. The topology of the proposed charging station for electric vehicles based on active rectifier circuits is presented. The parameters of the substitution circuits the battery compartment of the Tesla S electric vehicle are described. The method of fast battery charging with constant voltage and constant current is described, which provides a greater number of battery charge-discharge cycles. A simulation model of the proposed charging station structure with an automatic control system in the Matlab program is presented. The efficiency of the proposed charging station system was calculated for different parameters of the charge current and switching frequency. The results of modeling of electromagnetic processes, indicators of electromagnetic compatibility, oscillograms of input and output currents and voltages of the charging station were obtained.*

Keywords: *active rectifier, charging station, charging and discharging characteristics, electric vehicle, energy efficiency, lithium-ion battery.*

Анотація. *Наведено результати дослідження напівпровідникових перетворювачів зарядних станцій для електромобілів на основі літій-іонних елементів. Представлено базові енергетичні параметри та зарядно-розрядні характеристики літій-іонних та літій-залізо-фосфатних акумуляторів. Наведено топологію запропонованої зарядної станції для електромобілів на основі схем активного випрямляча. Представлено топологію активного*

трифазного випрямляча напруги, що має суттєві переваги порівняно з класичними діодними та тиристорними випрямлячами, а саме можливість забезпечення роботи з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці, можливість формування синусоїдальної форми струму, який споживається з електричної мережі, можливість забезпечення корекції коефіцієнта потужності. Описано параметри схеми заміщення акумуляторного відсіку електромобіля Tesla S. Описано метод швидкого заряду батареї постійною напругою і постійним струмом, при якому забезпечується більша кількість циклів заряду-розряду батареї. Представлено імітаційну модель запропонованої структури зарядної станції з системою автоматичного керування в програмному середовищі Matlab. Проведено розрахунок ККД запропонованої системи зарядної станції при різних параметрах струму заряду та частоти комутації. Отримано результати моделювання електромагнітних процесів, показників електромагнітної сумісності, осцилограми вхідних, вихідних струмів і напруг зарядної станції. Запропонована структура зарядної станції електромобілів, що складається з вхідного трансформатора, трирівневого активного випрямляча та навантаження, забезпечує відносно відомих технічних рішень зарядних станцій покращення параметрів коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності та коефіцієнта гармонічних спотворень. Отримані результати пояснюються тим, що запропонована зарядна станція реалізує одноетапне перетворення електроенергії в активному випрямлячі з корекцією коефіцієнта потужності.

Ключові слова: активний випрямляч, зарядна станція, зарядно-розрядні характеристики, електромобіль, енергоефективність, літій-іонний накопичувач.

Introduction. In the last decade, the number of electric vehicles in Europe has increased more than 20 times. This is due to the fact that electric vehicles are an environmentally friendly form of transport, and at the same time, the cost of moving an electric vehicle for 100 km is much lower than that of an internal combustion engine [1, 2].

At the moment, the share of electric vehicles in Europe is about 11 % of the total number and continues to grow. At the same time, in some countries the percentage of electric vehicles is much higher, for example, in Norway the share of electric vehicles is 75 %, in Iceland – 45 %, Sweden – 32 %, and the Netherlands – 25 %. In many ways, this growth is connected with the appearance of economical and long-lasting electricity batteries with high energy-dimensional indicators and with a decrease in their cost [3, 4].

Charging stations are an important component of the infrastructure of electric vehicles [5, 6]. Actual there is further development and improvement of power converters of charging stations for electric vehicles with lithium-ion, lithium-iron-

phosphate and other types of batteries, which ensure an increase in the energy efficiency of charging stations, as well as an improvement in the electromagnetic compatibility of charging stations with the electric network, a reduction in the emission of higher harmonics and reactive power component [7].

The power circuit with fast charging consists of three stages, namely: an input filter to reduce input harmonics, which also allows to optimize the power factor, a periodic and constant current rectifier, and a constant current converter, which transfers energy to the battery, for fast constant current charging from a hybrid electric vehicle [8, 9].

Literature review and problem statement. In paper [10], a converter with a nine-phase power supply system for a charging station for electric vehicles is considered. However, the disadvantages include the low value of efficiency, which reaches a maximum of 91 %. In addition, the converter presented in the work requires electromechanical decoupling of phases, which significantly increases the cost of the system and increases its weight and dimensions.

In papers [11, 12], a study of the IPT (inductive-power-transfer) type converter is presented, the feature of which is that instead of a diode bridge, fully controlled power transistors are used. According to the study, the efficiency of the converter when using power transistors based on silicon carbide (SiC) and gallium arsenide (GaN) is in the range of 83...98 %. However, it is worth noting that transistors based on SiC and GaN are much more expensive than classic MOSFETs or IGBT transistors. In addition, the paper does not contain data on the integral value of the efficiency of the complete charge process.

The paper [13] presents a study of the efficiency of an electric vehicle charging station based on a converter consisting of a rectifier and a parallel three-channel buck-boost converter. However, the disadvantage of this topology is the lack of galvanic separation of the power source and the load. In addition, according to research, the peak efficiency of the converter is less than 92 %, which is quite low. In addition, the work also lacks data on the integral value of the efficiency of the complete process of charging the battery of an electric vehicle.

A general drawback of the considered systems is the very concept of multi-stage energy conversion, which causes power losses

in converters and, accordingly, a decrease in the efficiency of the charging station [14, 15].

Thus, the issue of further improving the energy efficiency of charging stations for electric vehicles is an urgent and unsolved task.

The aim and objectives of the study.

The purpose of the paper is to increase the energy performance of the electric vehicles charging station by using an active rectifier that works in the power factor correction mode. To achieve this purpose, the following tasks are set:

- analyze the basic energy parameters and charge-discharge characteristics of batteries used in electric vehicles;
- to present the proposed structure of a charging station for electric vehicles based on an active rectifier;
- conduct a study of energy indicators, namely power losses and electricity quality indicators in the developed simulation model of a charging station based on an active rectifier.

The main part of the study. High-power lithium-ion batteries and their converters in charging stations. Traditional charging stations for electric vehicles, containing two stages of electricity conversion, consist of an input AC/DC rectifier and an output DC/DC converter (Fig. 1) [16, 17].

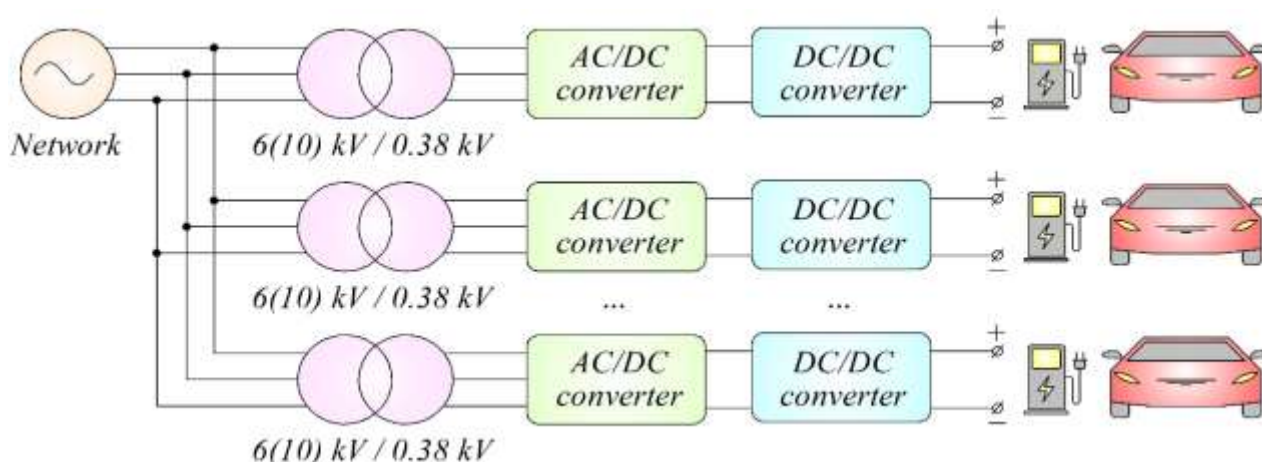


Fig. 1. Structural diagram of a traditional charging station for electric vehicles

In this topology, input rectifiers are used to create a constant voltage circuit. Next, the DC/DC converter provides regulation of the voltage and charge current of each individual electric vehicle in a given range. In some cases, the DC/DC converter is also used to provide

galvanic separation of the electric vehicle from the network [18, 19].

The most common element of electric vehicle batteries are lithium-ion batteries [20, 21]. The main parameters of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries are given in Table 1.

Table 1

Parameters of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries

Parameter	Li-Ion	Li-Fe-PO ₄	Li-Ti-O
Specific energy, Wh/kg	100...265	90...160	60...110
Energy density, Wh/L	240...693	325	170...180
Charge / discharge efficiency, %	80...90	≥90	–
Energy / consumer price, Wh/US\$	7.6	1...4	–
Cycle durability	400...1200	2750...12000	≥15000
Capacity, A·h	2.6	–	–
Max voltage, V	4.2	3.5	2.7
Nominal voltage, V	3.7	3.2	2.4
Discharge-cut voltage, V	3	2.1	1.5
Max charge voltage, V	4.2	3.65	–
Internal impedance of single battery, mOhm	≤70	≤15	–
Operating temperature, °C	0...+45 (charge) –20...+60 (discharge)	–	–
Recommended charge current, A	0.52 (standart, 0.2C) 1.3 (fast, 0.5C)	–	–

The charge-discharge characteristics of the LIR18650 lithium-ion battery at currents from 0.52 A to 7.2 A are shown in Fig. 2.

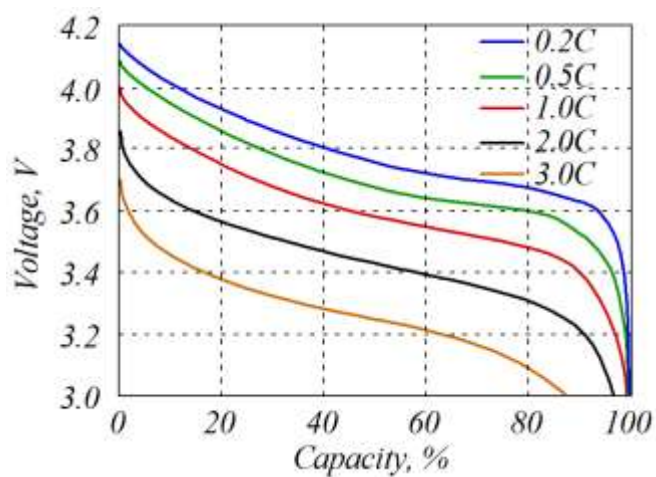
As can be seen from Fig. 2 lithium-ion batteries allow to deliver a fairly large current, but due to the presence of internal active resistance, at high currents there is a significant drop in the voltage delivered by the storage device.

At the same time, the amount of internal power losses in the battery will also increase, which will lead to its overheating. At the same time, the operating range of lithium-ion

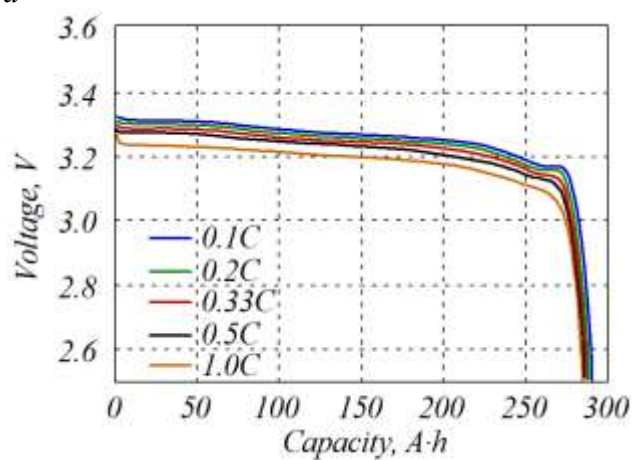
batteries in charge mode is from –20 °C to +45 °C, and in discharge mode from –20 °C to +60 °C.

When the temperature regime is exceeded, the battery loses a significant part of its capacity, and with a significant exaggeration of the temperature, the battery may catch fire and destroy [22, 23].

The recommended charging mode for Li-Ion batteries is the CV–CC (constant voltage – constant current) mode, which is shown in Fig. 3 [24, 25].



a



b

Fig. 2. Charge-discharge characteristics:
a – lithium-ion battery LIR18650; b – lithium-iron-phosphate battery LF280

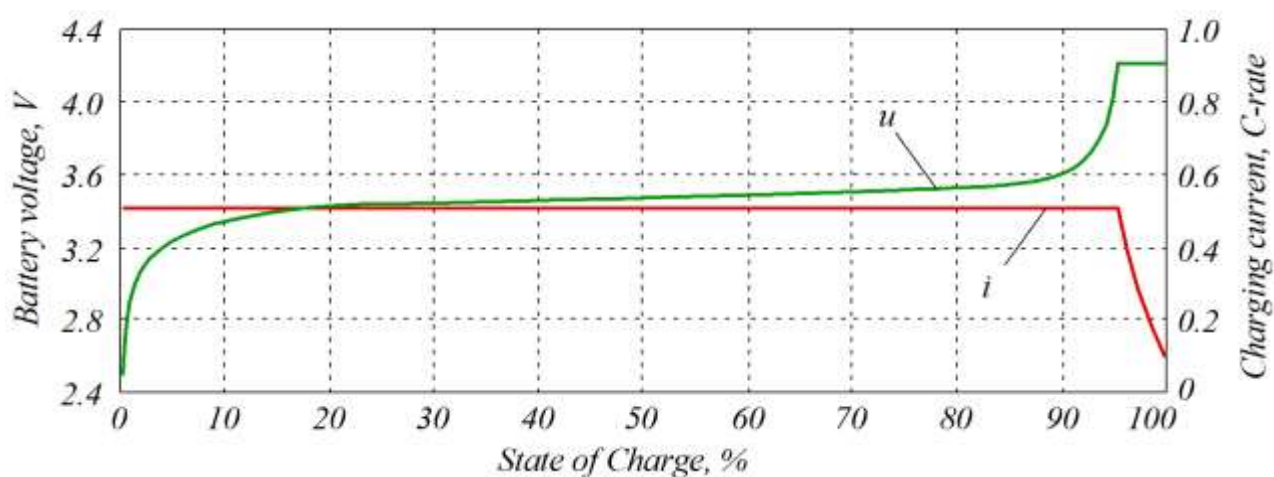


Fig. 3. Characteristics of the Li-Ion battery charge mode

Thus, there are several promising types of storage batteries, between which there is a fairly close correlation between cost and operational characteristics, namely, the resource of the amount of charge-discharge, charge time, degradation, and others.

At the same time, the main requirements of charging station systems are regulation and stabilization of charging current and voltage. In addition, it is also important to ensure the requirements for increasing the efficiency of the converter, and to ensure the requirements for electromagnetic compatibility.

Proposed topology of the single-link converter of electric vehicle charging stations.

Based on the recommended charge modes of lithium-ion storage devices, there are requirements for regulation and feedback of the output current and output voltage to the converters implementing the charge. In addition, in the case of power supply from the general industrial electrical network, electromagnetic compatibility requirements are imposed on them, namely the limitation of the harmonic spectrum of higher harmonics of currents that are consumed from the electrical network or generated to it. The topology of a single-link transformation of a charging station for electric vehicles is shown in Fig. 4.

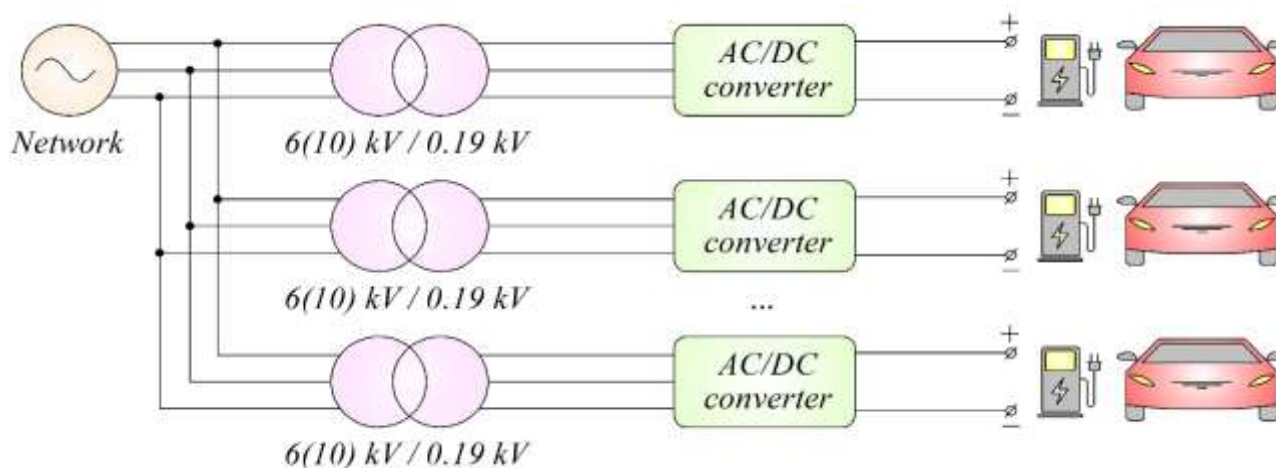


Fig. 4. Structural diagram of a single-link charging station for electric vehicles

Promising topologies that can provide the listed requirements for charge-discharge modes of powerful storage devices are an active three-phase current rectifier and an active three-phase voltage rectifier, the circuits of which are shown in Fig. 5, 6.

These topologies have significant advantages over classic diode and thyristor rectifiers, namely, the possibility of ensuring operation in a mode with a power factor close to unity, the possibility of forming a sinusoidal

form of the current consumed from the electrical network, the possibility of providing power factor correction.

Simulation modeling of the proposed charging station. A simulation model was developed in the Matlab program to conduct a study of energy indicators and indicators of electromagnetic compatibility of electric vehicle charging stations with the power supply network. The model of a charging station based on an active rectifier is shown in Fig. 7.

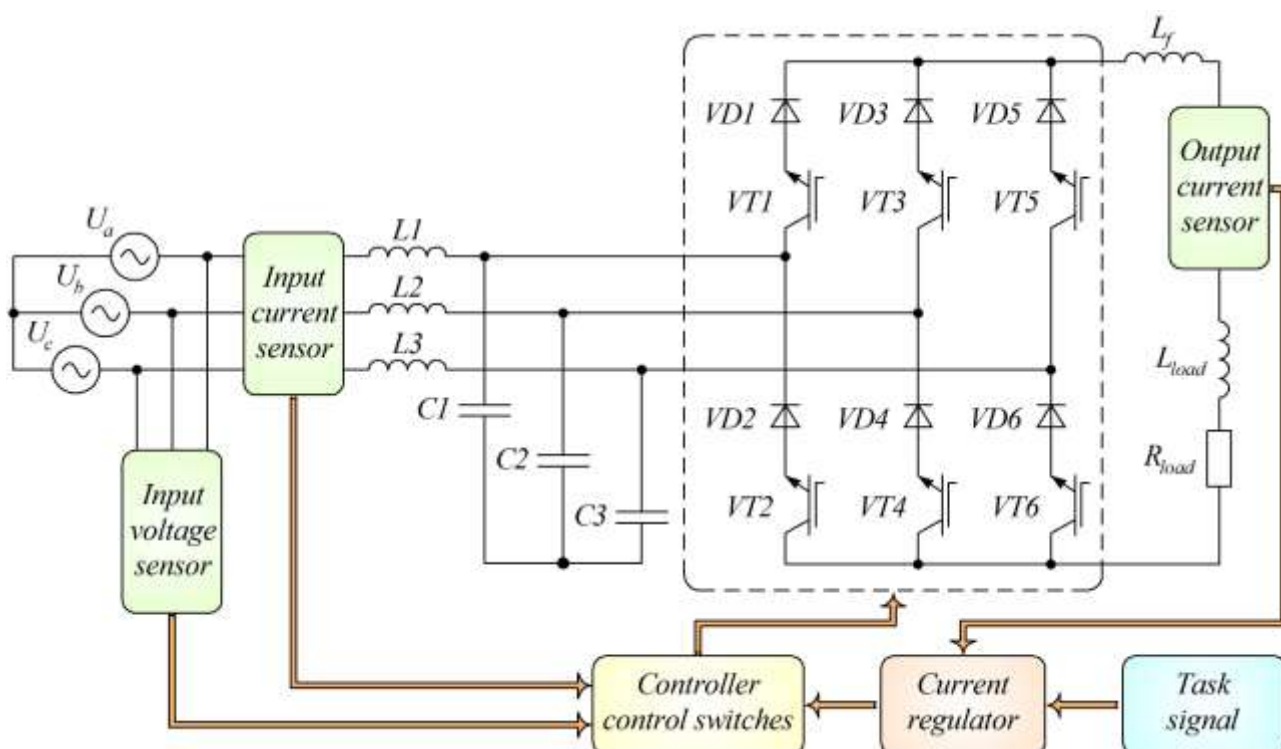


Fig. 5. Topology of an active three-phase current rectifier

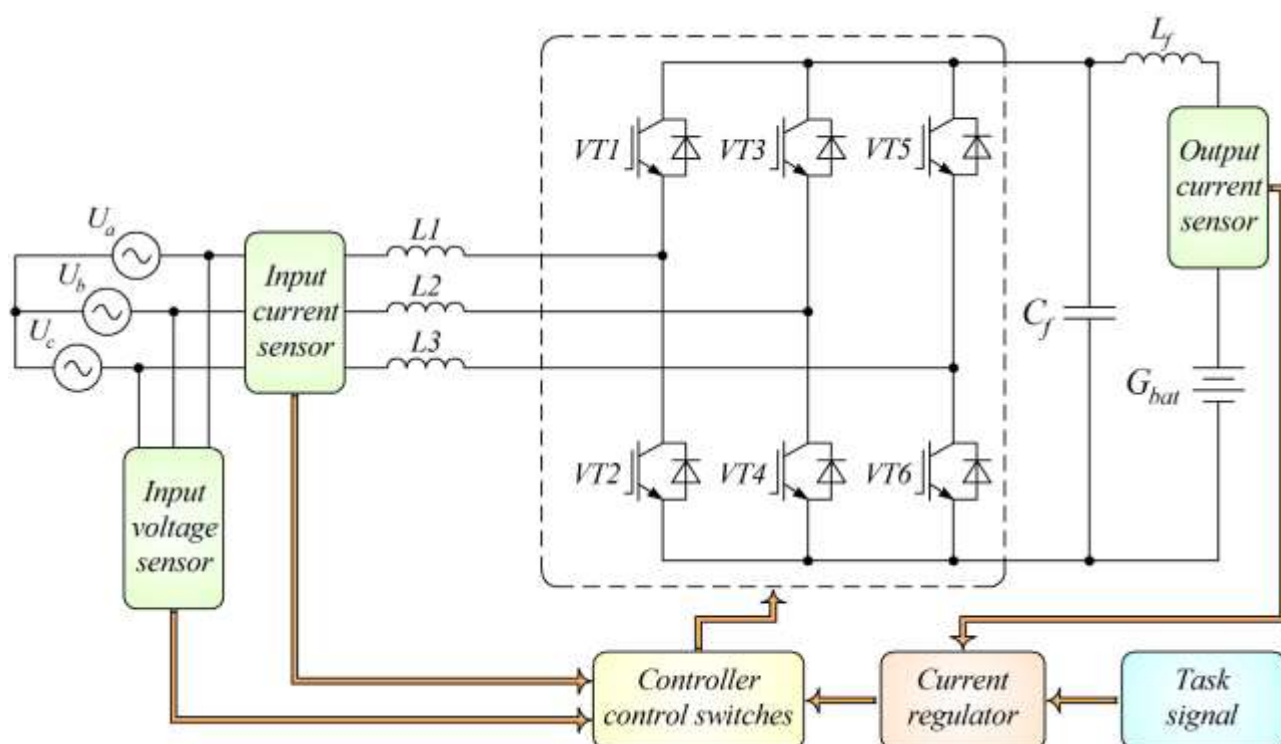


Fig. 6. Topology of an active three-phase voltage rectifier

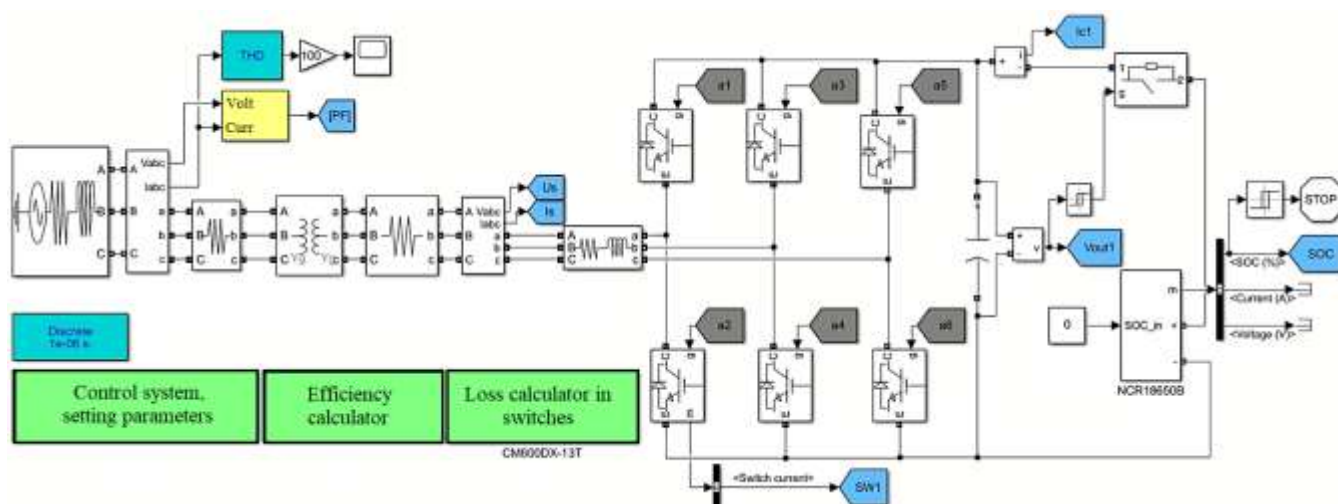


Fig. 7. A model of a charging station for electric vehicles

The proposed structure of the charging station for electric vehicles consists of an input transformer, a three-level active rectifier and a load. Tesla S electric vehicle was chosen as the load. The batteries compartment in the Tesla S

vehicle has a capacity of 85 kW·h and consists of 7104 pieces (16 modules, in which there are 6 groups of 74 cells each) lithium-ion batteries manufactured by Panasonic, type NCR18650b (Fig. 8).

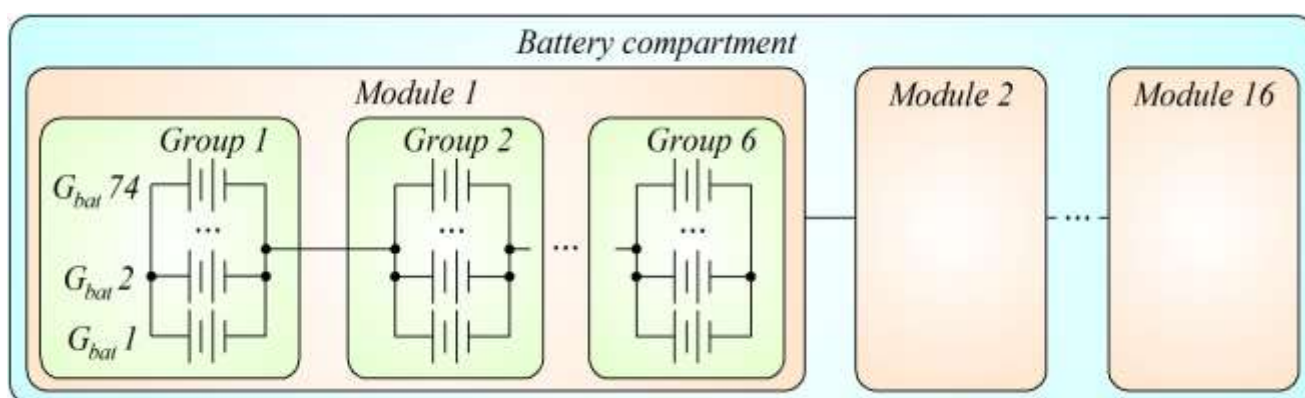


Fig. 8. The battery compartment in the Tesla S electric vehicle

In the battery compartment, individual batteries of the NCR18650b type are connected in parallel in groups of 74 cells. When connected in parallel, the voltage of the group is equal to the voltage of each of the elements (4.2 V), and the capacity of the group is equal to the sum of the capacities of the elements (250 A·h). Next, 6 groups are connected sequentially into a module. At the same time,

the voltage of the module is summed up from the voltages of the groups and is equal to 25.2 V. Then the modules are connected in series in the battery. In total, the battery contains 16 modules (a total of 96 groups). At the same time, the voltage of all modules is summed up and is 400 V. The equivalent resistance of the battery block is also calculated. Based on the fact that the average resistance of

one battery $R_{NCR} = 37 \text{ m}\Omega$ is equivalent to the battery resistance $R_{bat} = 27 \text{ m}\Omega$.

The simulation results, namely the oscillograms of the input current and input

voltage of the active rectifier are shown in Fig. 9.

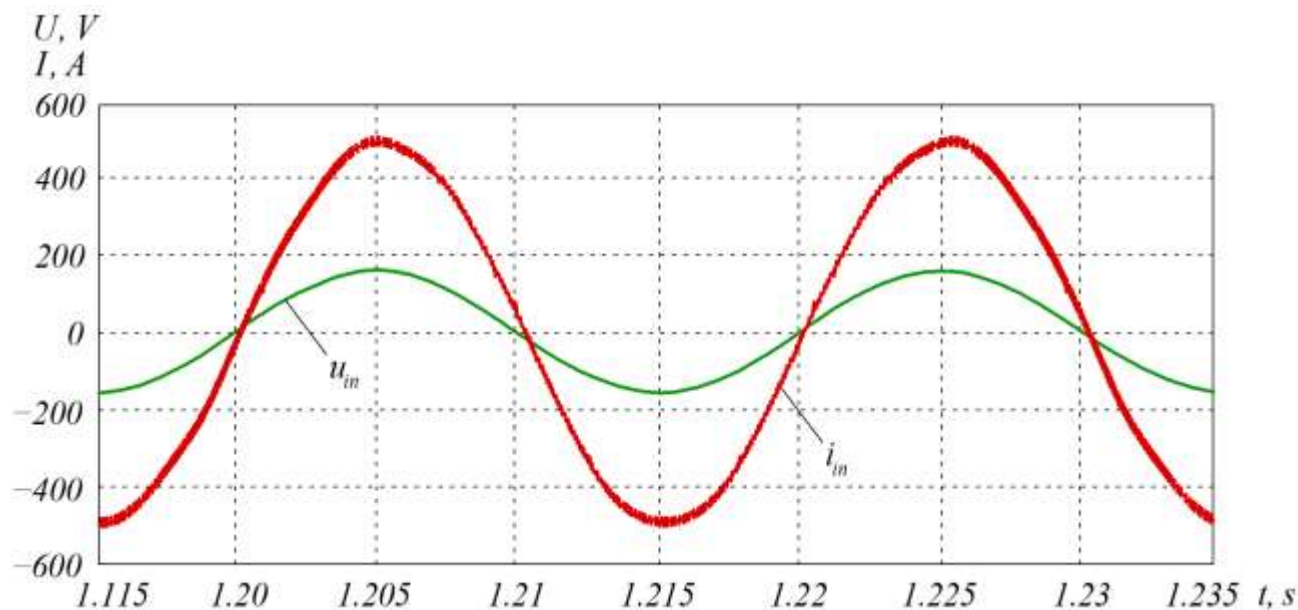


Fig. 9. Oscillograms of the input current and voltage of the active rectifier

The charge process, namely, the dynamics of changes in the output voltage, battery charge current, as well as the SoC (State of Charge) value of the battery over the entire charge interval are shown in Fig. 10.

The paper evaluates the efficiency of the proposed charging station. The efficiency was estimated based on the total energy losses and useful energy received by the battery during the full charge interval. The efficiency is calculated using the expression [26, 27]:

$$\eta = \frac{E_c}{E_c + \Delta E_\Sigma}, \quad (1)$$

where E_c is the useful energy transferred to the battery during charging; ΔE_Σ is the total energy losses in the considered system.

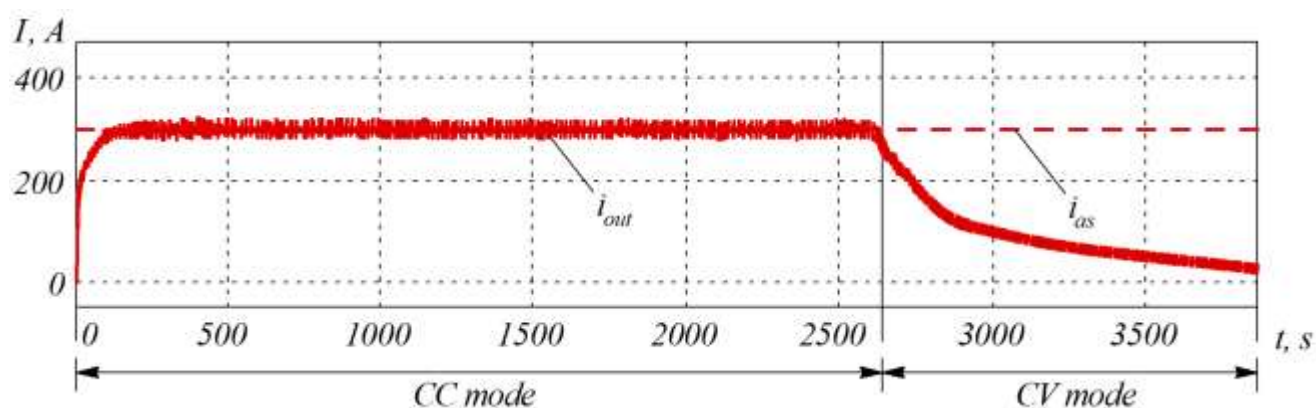
Table 2 shows the values of efficiency, power factor, and harmonic distortion factor of

the charging station system at different charge currents and PWM frequency.

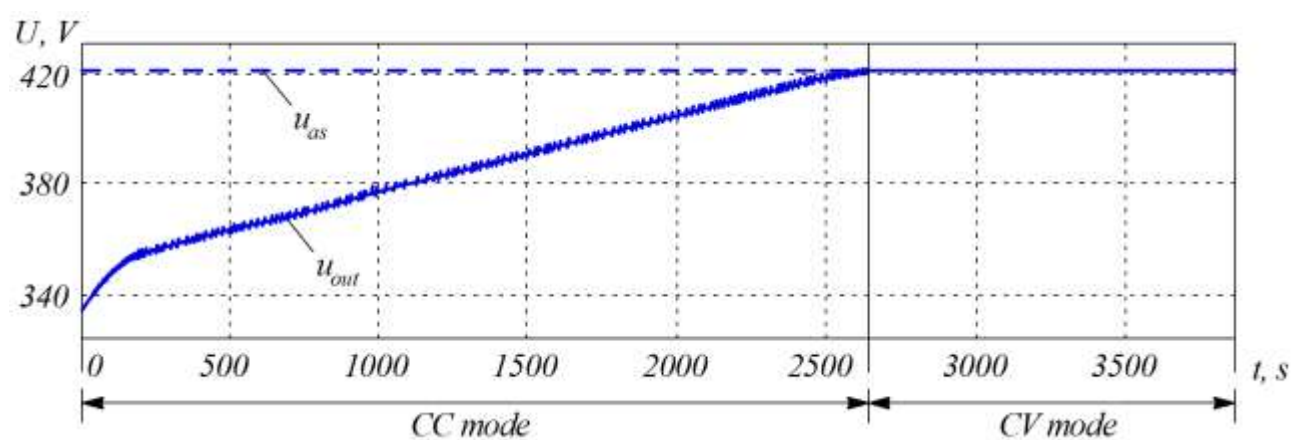
Based on the conducted research, it can be seen that the efficiency of the proposed structure of the charging station is quite high. The dynamics of the fact that the higher the charge current, the lower the efficiency is clearly visible. With different parameters of the charge current and switching frequency, the efficiency of the charging station, taking into account the power losses in the battery of the electric vehicle, ranges from 91.3 % to 95.6 %.

Conducted studies of the energy indicators of the charging station based on a three-level active rectifier showed that the power factor of the charging station lies in the range from 0.985 to 0.993.

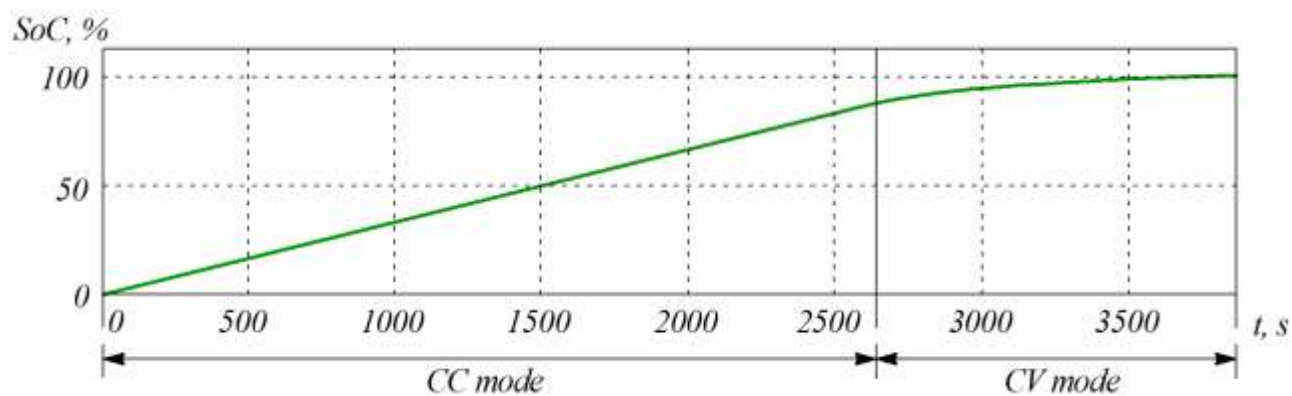
The coefficient of harmonic distortion in the charging process ranges is 2.5...11.8 %.



a



b



c

Fig. 10. Oscillograms of charging station operation:
 a – output current and task current (CC);
 b – output voltage and task voltage (CV);
 c – battery charge level

Table 2

Parameters of energy indicators of the charging station

PWM frequency, kHz	Charge current in CC mode, A	Efficiency, %	Charging time, s, $\cdot 10^3$	Power factor	THD, %
5	150 (0.6C)	95.6	6.55	0.985	11.8
	200 (0.8C)	94.8	5.18	0.987	9.8
	250 (1C)	93.9	4.38	0.989	7.2
	300 (1.2C)	93.1	3.84	0.991	6.0
	350 (1.4C)	92.2	3.47	0.992	5.1
	400 (1.6C)	91.4	3.2	0.992	4.5
10	150 (0.6C)	95.4	6.55	0.987	6.1
	200 (0.8C)	94.5	5.19	0.99	4.6
	250 (1C)	93.7	4.38	0.991	3.7
	300 (1.2C)	92.9	3.85	0.992	3.1
	350 (1.4C)	92.1	3.48	0.992	2.7
	400 (1.6C)	91.3	3.2	0.993	2.5

Conclusions. On the basis of the conducted research, the following conclusions can be drawn:

- basic energy parameters and charge-discharge characteristics of lithium-ion and lithium-iron-phosphate batteries used in electric vehicles are presented. The main requirements for charging station systems are regulation and stabilization of the charging current and voltage, increasing the efficiency of the converter and ensuring electromagnetic compatibility;

- the proposed structure of an electric vehicle charging station, consisting of an input transformer, a three-level active rectifier and a load, provides relative to the known technical

solutions of charging stations, improvement of the parameters of efficiency, power factor and harmonic distortion factor. The obtained results are explained by the fact that the proposed charging station implements a single-stage conversion of electricity in an active rectifier with power factor correction;

- the calculation of the efficiency of the charge process of the proposed system was vehicleried out at different parameters of the charge current and switching frequency. Taking into account the power losses in the battery of the electric vehicle, the maximum efficiency of the system is achieved in the mode of minimum charging current.

The article was prepared as part of the support of the grant of young scientists of Ukraine «Development of scientific bases for improving energy efficiency and improving the quality of electricity in electricity networks» (State Registration Number 0121U109440).

Reference

1. Frincu R., Misso F. E., Repetto C. E-light vehicles in European cities: Starting from “Ele. C. Tra.-Electric City Transport” experience, ready to take up new challenges. *2017 Electric Vehicles International Conference (EV)*. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/EV.2017.8242114.

2. Dell'Amico M., Hadjidimitriou N. S., Renzi G. Assessing the Impact of Shared L-Category Electric Vehicles in six European cities. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2020. P. 1–5 DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294355.
3. Matanov N., Zahov A. Developments and Challenges for Electric Vehicle Charging Infrastructure. *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/BulEF51036.2020.9326080.
4. Marinelli M., Calearo L., Ried S., Pfab X., Cesar J., Spalthoff C., Braun M. Electric Vehicles Demonstration Projects – An Overview Across Europe. *2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC49904.2020.9209862.
5. Pareek S., Sujil A., Ratra S., Kumar R. Electric Vehicle Charging Station Challenges and Opportunities: A Future Perspective. *2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICONC345789.2020.9117473.
6. Saldarini A., Barelli L., Pelosi D., Miraftebzadeh S., Longo M., Yaici W. Different Demand for Charging Infrastructure along a Stretch of Highway: Italian Case Study. *2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (I&CPS Europe)*. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854643.
7. Pliakostathis K. Research on EMI from Modern Electric Vehicles and their Recharging Systems. *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/EMCEUROPE48519.2020.9245742.
8. Oliinyk M., Dzmura J., Pal D. The impact of a electric vehicle charging on the distribution system. *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269213.
9. Weiss M., Zerfass A., Helmersb E. Fully electric and plug-in hybrid cars. An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO₂ and air pollutant emissions. *Clean Prod.* 2019. Vol. 212. P. 1478–1489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.019.
10. Bodo N., Levi E., Subotic I., Espina J., Empringham L., Johnson C. M. Efficiency Evaluation of Fully Integrated On-Board EV Battery Chargers With Nine-Phase Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2017. Vol. 32, No. 1. P. 257–266. DOI: 10.1109/tec.2016.2606657.
11. Taylor A., Lu J., Zhu L., Bai K., McAmmond M., Brown A. Comparison of SiC MOSFET-based and GaN HEMT-based high-efficiency high-power-density 7.2kW EV battery chargers. *IET Power Electronics*. 2018. Vol. 11, No. 11. P. 1849–1857. DOI: 10.1049/iet-pel.2017.0467.
12. Huang Z., Lam C.-S., Mak P.-I., Martins R., Wong S.-C., Tse C. K. A Single-Stage Inductive-Power-Transfer Converter for Constant-Power and Maximum-Efficiency Battery Charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 9. P. 8973–8984. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2969685.
13. Kim D.-H., Kim M.-J., Lee B.-K. An Integrated Battery Charger With High Power Density and Efficiency for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32, No. 6. P. 4553–4565. DOI: 10.1109/tpel.2016.2604404.
14. Lee W.-S., Kim J.-H., Lee J.-Y., Lee I.-O. Design of an Isolated DC/DC Topology With High Efficiency of Over 97% for EV Fast Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, No. 12. P. 11725–11737. DOI: 10.1109/TVT.2019.2949080.
15. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 1, No. 181. P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.

16. Vinoth Kumar K., Radhakrishnan P., Kalaivani R., Devadoss V., Vijay Anand L. D., Vinodha K. Implementation of Smart Electric Vehicle Charging Station Driven Using Experimental Investigation. *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. 2021. P. 1–5. DOI: 10.1109/GCAT52182.2021.9587788.
17. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
18. Aggarwal S., Bajaj M., Singh A. K. Analysis of Electric Vehicle Charging Station Allocation in Deregulated Electric Power System. *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9113022.
19. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskyi H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multi-level inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5, Issue 3. P. 118–121.
20. Nuamkoksung P., Buayai K., Kongjeen Y. Impact of Fast Charging on Lithium-ion Battery in Electric Vehicle Application. *2020 8th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/iEECON48109.2020.244120.
21. Nabi Akpolat A., Yang Y., Blaabjerg F., Dursun E., Emin Kuzucuoglu A. Li-ion-based Battery Pack Designing and Sizing for Electric Vehicles under Different Road Conditions. *2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/SEST48500.2020.9203196.
22. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.
23. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
24. Park M., Seo M., Song Y., Kim S. W. Capacity Estimation of Li-Ion Batteries Using Constant Current Charging Voltage With Multilayer Perceptron. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 180762–180772. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3028095.
25. Huang X., Li Y., Acharya A., Sui X., Meng J., Teodorescu R., Stroe D.-I. A Review of Pulsed Current Technique for Lithium-ion Batteries. *Energies*. 2020. Vol. 13. 2458. DOI: 10.3390/en13102458.
26. Milushev G. Measurement of the Efficiency of Electric Vehicle Charging Stations. *2020 XXX International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/MMA49863.2020.9254255.
27. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12.
E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Нерубацький Володимир Павлович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.
Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20.
E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.
E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Статтю прийнято 20.06.2023 р.

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT

Випуск 204

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 21.06.2023 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 9,5. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.