



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 201

Харків 2022

УДК 656.2(062)

У збірнику наукових праць УкрДУЗТ публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки, 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 УкрДУЗТ 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 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 5 від 30 вересня 2022 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються 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).

Редакційна колегія

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

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

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка 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)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
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 (Tohoku University, Японія)

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., доцент (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)
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)

- Ремарчук М. П., Чмуж Я. В., Галицький О. О., Кебко О. В., Соколов Р. Є.*
Методика формування загонів машин для земляних робіт на прикладі
застосування навантажувачів 6
- Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А., Хоружевський Г. А.,
Харін Р. О.* Аналіз структур і динаміки систем керування вітровими
генераторами 14
- Romanovych Ye., Lobiak O., Kravets Andrii, Yevtushenko A., Povorozhenko Ye.,
Kravets A.* Method for Determining the Parameters of Springs of Combined Spring
Sets 31

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Резнік П. А., Альмохамд М., Тенесеску В. В.* Аналіз конструктивних рішень
існуючих будівель житлового фонду міста Харкова щодо їхньої
працездатності внаслідок впливу бойових дій 41

Геодезія та землеустрій (193)

- Мамонов К. А., Саян О. С., Орел Є. Ф., Камчатна С. М.,
Пустовойтова О. М.* Оптимізація розміщення точок умовної реперної мережі
для кривих ділянок залізниць 57

Транспортні технології (275)

- Мельник О. М., Волошин А. О., Онищенко О. А., Щербина О. В.,
Васалатій Н. В., Нікітюк П. В.* Організація забезпечення інформаційної
безпеки морського судна 69

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 69.002.5:625.08

**МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ЗАГОНІВ МАШИН ДЛЯ ЗЕМЛЯНИХ РОБІТ
НА ПРИКЛАДІ ЗАСТОСУВАННЯ НАВАНТАЖУВАЧІВ**

Д-р техн. наук М. П. Ремарчук, канд. техн. наук Я. В. Чмуж, асп. О. О. Галицький,
асист. О. В. Кебко, викл. вищ. кат. Р. Є. Соболев

**METHODOLOGY OF FORMATION DETACHMENTS TECHNIQUES FOR
CONSTRUCTION RAILWAY TRACKS AND HIGHWAYS**

D. Sc. (Tech.) M. Remarchuk, PhD (Tech.) Ya. Chmuzh, postgraduate student O. Halytskyi,
assistant O. Kebko, a teacher of the highest category R. Sobolev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267771>



Анотація. Створена методика формування загонів із різних машин за функціональним призначенням для виконання земляних робіт на прикладі дослідження однокерованих навантажувачів. Доведено, що з масиву однорідних машин за функціональним призначенням виділяється одна з них, що є зразковою і характеризується максимальним коефіцієнтом корисної дії і мінімальними витратами палива відносно її продуктивності та мінімальними відносними втратами палива порівняно з подібними машинами. На основі таких машин з різною їхньою кількістю можна формувати відповідні загони машин, здатних виконувати заданий об'єм роботи при мінімальних витратах палива та мінімальних термінах виконання такого обсягу роботи.

Ключові слова: методика, навантажувач, витрати палива, продуктивність, потужність, коефіцієнт корисної дії, загін машин.

Abstract. Based on the results of the study, on the basis of a systematic approach and reference parameters, a methodology for the formation of detachments from various machines according to their functional purpose for performing earthworks was created on the example of using single-bucket loaders. Studies have shown that from an array of homogeneous machines for functional purposes, it is necessary to determine one of them, which is exemplary. The exemplary machine, as shown by the results of research, is characterized by maximum efficiency and minimum fuel consumption in relation to its performance and zero relative fuel losses compared to known cars. Such a machine, which is defined as an example, as part of other machines recognized as exemplary, allows you to form a fleet of various machines capable of performing a given amount of work with minimal fuel consumption and minimal duration of such amount of work.

To obtain the results that are described above a number of conditions must be met, which include the following:

- each of the machines is treated as a complex technical system using known assumptions;
- all technical and economic parameters of such machines are used from known scientific sources or on the basis of their own research;
- for all homogeneous machines, it is necessary to determine the indicators in the form of total efficiency and the value of the specific fuel consumption;

– determine, on the basis of this methodology, the amount of fuel saving relative to an exemplary vehicle, which is accepted as the most efficient and due to which the necessary squad of vehicles is formed.

The result of the application of the created technique is the ability to determine the value of the relative fuel economy for the formed detachment of machines. The value of this savings depends on the duration of the specified volume of work by the formed detachment of machines.

Keywords: technique, loader, fuel consumption, performance, power, coefficient of useful action, squad of machines.

Вступ. Виконання значного об'єму робіт різними машинами потребує знання конструктивних і функціональних особливостей кожної машини в структурі технологічного процесу при забезпеченні послідовності будівництва залізничних споруд та автомобільних доріг. На початковій стадії будівництва залізничних споруд та автомобільних доріг потрібне виконання значних об'ємів земляних робіт. Для проведення таких робіт широко використовуються різні машини для земляних робіт, зокрема бульдозери, екскаватори, автогрейдери та інші машини, тобто енергоємних машин, сформованих, як правило, в ефективні заго-ни, що потребують для виконання земляних робіт значних матеріальних ресурсів. Вони складаються з витрат на паливо, оплату праці машиніста, амортизаційні витрати для оновлення машин та інші [1-3].

На сьогодні виробниками землерийних машин запроваджено досить широкий масив подібних машин, призначених для виконання властивих для них земляних робіт. Комплектування з масиву різних машин у спеціальні заго-ни для забезпечення високого рівня ефективності їхньої роботи в експлуатаційних умовах, на перший погляд, є досить простим процесом, і при цьому не виникає особливих труднощів, оскільки забезпечується на основі використання загальнодоступної інформації, яка, як відомо, наведена в технічній документації і довідковій літературі. Дослідним шляхом встановлено, що на основі такого підходу до процесу формування цих заго-нів зі складу відомих землерийних машин для виконання заданого об'єму робіт на основі суб'єктивної інформації не гарантує

прийняття правильного рішення, і тому процес формування заго-нів потребує подальшого дослідження [4-6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За роботою [7, с. 204], «показники ефективності можуть бути визначені шляхом обробки даних натурного експерименту, а також методами моделювання, зокрема економіко-математичного». У цій же роботі зазначено, що «систему показників оцінювання ефективності землерийних машин доцільно формувати на базі такого узагальненого показника, як питомі приведені витрати, які з урахуванням відповідних зв'язків й обмежень найбільш повно відповідають розглянутим вимогам». Дотримуються цієї точки зору й інші дослідники [8]. Встановлено, що в роботі [8, с. 173] зазначено, що «критерій ефективності повинен мати такі характеристики:

- вимірювати справжню ефективність обраного варіанта;
- виражатися кількісно;
- для розв'язуваної задачі має бути один критерій;
- визначуватися критерій має точно і швидко, без великих витрат часу;
- забезпечувати облік всіх істотних сторін розв'язуваної задачі;
- мати фізичний зміст, що робить його зрозумілим і відчутним».

У роботі [8, ст. 186, 187] наведено аналіз з визначення економічно вигідної конструкції одного з бульдозерів на підставі масиву з трьох бульдозерів різних марок. Цей аналіз базується на визначенні собівартості продукції, отриманої бульдозерами з урахуванням таких факторів: об'єму роботи; дальності транспортування ґрунту.

Наведений огляд з цієї проблеми свідчить, що вона потребує подальшого свого дослідження, оскільки належить до актуальної проблеми на сьогодні.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є створення наукової методики для обґрунтованого формування загонів машин для виконання земляних робіт, яким властивий високий рівень ефективного функціонування в умовах експлуатації при забезпеченні максимальної продуктивності з мінімальними витратами палива та які здатні до виконання заданого об'єму робіт за встановлений термін роботи.

Для досягнення вказаної вище мети необхідно вирішити такі завдання:

- застосувати системний підхід до розгляду одноковшових навантажувачів як складної системи з визначенням усіх її складових стану;
- обґрунтувати показники для визначення ефективності функціонування одноковшових навантажувачів в умовах експлуатації за довідковими параметрами;
- визначити з масиву однорідних одноковшових навантажувачів один із них як ефективний і прийняти його зразковим навантажувачем;
- визначити рівень економії палива для всіх одноковшових навантажувачів відносно зразкового навантажувача;

– обґрунтувати методику формування загонів машин для виконання земляних робіт різними машинами.

Основна частина дослідження.

Розроблення методу формування загонів машин для земляних робіт базується на застосуванні системного аналізу з одночасним використанням довідкових параметрів [9] одноковшових навантажувачів. Причому одноковшовий навантажувач розглядається як досить складна система зі своїми входами і виходами та внутрішнім станом. Така система складається з різних структурних елементів, функціонально з'єднаних між собою. Усі структурні елементи навантажувача забезпечують перетворення потужності на його вході в корисну роботу на виході. На основі застосування системного підходу і довідкових даних стає можливим визначати внутрішній стан одноковшових навантажувачів через показники у вигляді величини загального коефіцієнта корисної дії (ККД), питомих витрат палива та відносних втрат палива.

Досліджувати навантажувач як транспортну землерийну машину слід як структурну систему з її внутрішніми складовими і параметрами внутрішнього стану та зовнішніми параметрами входу і виходу, яку у спрощеному схемному вигляді подано на рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема одноковшового навантажувача

Цифрами позначено такі складові: 1 – джерело енергії, ДВЗ; 2 – силове обладнання; 3 – робоче обладнання; 4 – робочий процес; 5 – оператор. У системі навантажувача оператор (машиніст), як припущення, приймається висококваліфікованим, стан якого не впливає на продуктивність машини.

Параметрами входу для одноковшового навантажувача як складної системи, за рис. 1, є витрати ДВЗ палива $G_{пј}$ і теплотвірна здатність $I_{п}$ цього палива. Вихідними параметрами для одноковшового навантажувача є його продуктивність $\Pi_{еј}$ і питоме зусилля різання (копання) ґрунту $K_{гр}$, що залежить від категорії ґрунту. Ці параметри відомі і наводяться в широко доступних наукових довідниках.

Для застосування системного підходу необхідно визначити ряд техніко-економічних параметрів:

- марку ДВЗ як джерело енергії;
- потужність джерела енергії машини;
- питомі витрати палива для двигуна;
- категорію ґрунту і питомий опір різання (копання) ґрунту;
- середню експлуатаційну продуктивність.

Об’єктом дослідження, виходячи з наведеного вище, є відомі навантажувачі, що забезпечують виконання властивих для них земляних робіт. Техніко-економічні параметри різних одноковшових навантажувачів [9], що в умовах експлуатації широко використовуються для виконання земляних робіт, подано в табл. 1.

Таблиця 1

Довідкові техніко-експлуатаційні параметри одноковшових навантажувачів [9]

Марка навантажувача	ТО-2	ТО-17	ТО-18	ТО-11	ТО-8	ТО-24	ТО-21
Марка ДВЗ	Д-54А	АМ-41	АМ-01	ЯМЗ-238НБ	ЯМЗ-238	8ДВТ-330	В2-550ТК-П5
Потужність ДВЗ $N_{двзј}$, кВт (к.с.)	39,7 (54)	66,1 (90)	80,8 (110)	158,0 (215)	161,7 (220)	242,6 (330)	404,4 (550)
Питомі витрати палива $q_{дв}$, г/к.с. год	205	170	185	175	157	170	220
Категорія ґрунту	II						
Питомий опір розробки ґрунту $K_{гр}$, кПа	160						
Експлуатаційна продуктивність $\Pi_{еј}$, м ³ /год	22,5	37	50,9	74	100	427	760
Вантажопідйомність, т (ємність ковша, м ³)	1,5/ (0,82)	2,0/ (1,0)	3,0/ (1,5)	4,0/ (2,0)	5,0/ (2,8)	10,0/ (5,0)	15,0/ (7,5)

За довідковими даними, наведеними в табл. 1, витрати палива $G_{пј}$ за одну годину

роботи одноковшового навантажувача [10, 11] визначаються за формулою, кг/год,

$$G_{пј} = 1,03 \times 10^{-3} \times N_{двзј} \times q_{дв} \times k_N \times k_{дв} \times k_{дп}, \quad (1)$$

де $N_{двзj}$ – номінальна потужність ДВЗ, к.с.;

$q_{дв}$ – величина питомих витрат палива для ДВЗ, за довідковими значеннями, г/к.с. год;

k_N , $k_{дв}$, $k_{дп}$ – коефіцієнти, що враховують зміну витрат палива залежно від інтенсивності навантаження ДВЗ навантажувача за часом роботи і тривалістю дії потужності, що відповідно складають 1,18; 0,86 та 0,75.

Вхідна (загальна) потужність для навантажувача, позначена як $N_{пj}$ [10, 11], визначається за формулою, кВт,

$$N_{пj} = (G_{пj} \times I_{п}) / 3600, \quad (2)$$

де $I_{п}$ – теплотвірна здатність палива, кДж/кг.

За даними роботи [10], теплотвірна здатність дизельного палива складає середнє значення 42700 кДж/кг.

Для визначення корисної потужності на виході навантажувача, як складної системи, за довідковими даними, наведеними в табл. 1, використовувались його продуктивність і питомий опір різання (копання) ґрунту. Тоді потужність для навантажувача, що позначено як $N_{корj}$, визначається за формулою [10, 11], кВт,

$$N_{корj} = (K_{гр} \times \Pi_{ej}) / 3600, \quad (3)$$

де Π_{ej} – продуктивність навантажувача, за довідковими даними, м³/год;

$K_{гр}$ – питомий опір різання (копання) ґрунту при виконанні одноковшовим навантажувачем робочого процесу, кПа.

Загальний ККД [10, 11] при роботі навантажувача η_j визначається як

$$\eta_j = (G_{пj} \times I_{п}) / (\Pi_{ej} \times K_{гр}) = N_{корj} / N_{пj}. \quad (4)$$

Показник питомих витрат палива для кожного з навантажувачів, який позначено як k_j , визначається за формулою, кг/м³,

$$k_j = G_{пj} / \Pi_{ej}. \quad (5)$$

Сумісний розгляд результатів дослідження, отриманих за залежностями (4) і (5), дозволив виявити особливу закономірність між величиною загального ККД одноковшових навантажувачів і величиною питомих витрат палива для цих же машин. Особлива закономірність полягає в тому, що один із одноковшових навантажувачів характеризується максимальним значенням загального ККД і при цьому мінімальною величиною питомих витрат палива. Такий одноковшовий навантажувач названо зразковим, і для цього навантажувача величина питомих витрат палива позначена як k_{min} . Інші досліджувані навантажувачі віднесено до звичайних, і величину питомих витрат палива позначено як k_j . На підставі наведеного вище стає можливим встановити величину відносних витрат палива протягом години роботи для кожного з навантажувачів. Ці втрати палива, позначені як Δq_j , визначаються за формулою, кг/год,

$$\Delta q_j = G_{пj} - k_{min} \cdot \Pi_{ej}, \quad (6)$$

де $G_{пj}$ – витрати палива ДВЗ кожного з навантажувачів, що визначаються за залежністю (1), кг/год;

k_{min} – показник питомих витрат палива зразкового одноковшового навантажувача, який приймається за вказаною вище умовою, кг/м³;

Π_{ej} – експлуатаційна продуктивність кожного одноковшового навантажувача, наведена в табл. 1, м³/год.

Для масиву досліджуваних одноковшових навантажувачів на підставі

використання залежностей (1)-(6) отримано числові результати, наведені в табл. 2. Так, у першому стовпці табл. 2 подано всі марки навантажувачів відповідно до табл. 1. Наступні стовпці табл. 2, зокрема другий, третій і четвертий, відображують числові результати для всіх одноковшових навантажувачів, отриманих за залежностями (1)-(3). Стовпець п'ятий табл. 2 відображує внутрішній стан одноковшових навантажувачів - загальний ККД, який визначається за залежністю (4). Шостий стовпець відображує собою

результати питомих витрат палива на одиницю продуктивності для кожного з навантажувачів, отриманих на основі залежності (5). Сьомий стовпець табл. 2 відображує величину відносних втрат палива впродовж години роботи для кожного з навантажувачів (формула (6)). Причому для зразкового навантажувача, зокрема ТО-24, втрати палива характеризуються нульовим значенням порівняно з іншими машинами. Усі розрахункові параметри, наведені в табл. 2, для цього навантажувача виділено курсивом.

Таблиця 2

Результати дослідження одноковшових навантажувачів

Марка крана	Витрати палива ДВЗ $G_{пj}$, кг/год., ф. (1)	Потужність, приведена $N_{пj}$, кВт, ф. (2)	Потужність корисна $N_{корj}$, кВт, ф. (3)	Загальний ККД машини, η_j , ф. (4)	Питоми витрати палива k_j , ф. (5)	Відносні втрати палива Δq_j , кг/год, ф. (6)
1	2	3	4	5	6	7
ТО-2	8,678	102,93	1,00	0,0097	0,38568	6,3607
ТО-17	11,994	142,262	1,64	0,0115	0,32416	8,1833
ТО-18	15,953	189,22	2,26	0,0119	0,31341	10,7108
ТО-11	29,495	349,84	3,28	0,0093	0,39858	21,8737
ТО-8	27,077	321,16	4,44	0,0138	0,27077	16,7780
<i>ТО-24</i>	<i>43,978</i>	<i>521,62</i>	<i>18,97</i>	<i>0,0363</i>	<i>0,10299</i>	<i>0</i>
ТО-21	94,855	1125,08	33,77	0,0335	0,12480	16,5826

Для визначення рівня економії палива для всіх навантажувачів відносно зразкового навантажувача, прийемо умову, за якою об'єм матеріалу, що розробляється кожним одноковшовим навантажувачем, складатиме величину близько 760 м³. Вибір цього об'єму ґрунту базується на тому, що такий об'єм ґрунту розробляється одноковшовим навантажувачем ТО-21 за одну годину роботи з величиною продуктивності на рівні $\Pi_{ej} = 760 \text{ м}^3/\text{год}$ (табл. 1).

На підставі такого підходу складається можливість для визначення часу t_j для виконання заданого об'єму роботи 760 м³

кожним із одноковшових навантажувачів, год:

$$t_j = V/\Pi_{ej}, \quad (7)$$

де V – об'єм матеріалу 760 м³, який розробляється кожним із одноковшових навантажувачів, м³;

Π_{ej} – експлуатаційна продуктивність кожного з одноковшових навантажувачів (табл. 1).

Загальні витрати палива Q_{zj} для кожного з одноковшових навантажувачів при виконанні ними однакового об'єму роботи з відомою власною продуктивністю

з урахуванням часу, встановленого для кожного з них, можна визначити за формулою, кг,

$$Q_{zj} = t_j \cdot G_{пj}, \quad (8)$$

де $G_{пj}$ – витрати палива ДВЗ, визначені для кожного одноковшового навантажувача (табл. 2).

Величина загальних витрат палива ДВЗ при виконанні кожним із навантажувачів однакового об'єму роботи 760 м^3 , у навантажувача марки ТО-24, який взнано як зразковий з витратами палива на

рівні мінімальної величини $Q_{\text{кон}}$, яка дорівнює масі $78,28 \text{ кг}$. Величина витрат палива для всіх досліджуваних навантажувачів порівняно з витратами палива для зразкового навантажувача можна подати як відносну економію палива ΔQ_j і визначити її за формулою, кг,

$$\Delta Q_j = Q_{zj} - Q_{\text{кон}} \cdot (9)$$

Усі отримані результати дослідження за залежностями (7)-(9) і витрати палива $Q_{\text{кон}}$ для зразкового навантажувача подано в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків величини відносної економії палива

Марка навантажувача	ТО-2	ТО-17	ТО-18	ТО-11	ТО-8	ТО-24	ТО-21
Час на виконання заданого об'єму земляних робіт, год, ф. (7)	32,88	20,54	14,93	10,27	7,6	1,78	1,0
Загальні витрати палива, кг, ф. (8)	285,33	246,27	238,17	302,91	205,78	78,28	94,85
Зразковий навантажувач, витрати палива $Q_{\text{кон}}$, кг	78,28						
Відносна величина економії палива, кг, ф. (9)	207,05	167,99	159,89	224,63	127,5	0	16,57

Результати дослідження, наведені в табл. 3, направлені на виявлення з масиву навантажувачів одного з них як найбільш ефективного з точки зору мінімальних витрат палива при виконанні однакового об'єму і за мінімальний час. Таким умовам, за табл. 3, відповідає навантажувач ТО-24. На основі цього методу можна визначити найбільш ефективну машину з масиву різних машин для земляних робіт, зокрема бульдозерів, скреперів та інших машин. Із виявлених найбільш ефективних машин на підставі виконаних досліджень за цим методом можна формувати загони високоефективних машин для виконання земляних робіт.

Висновки:

1. Системний підхід дозволив визначити всі показники стану в навантажувача.
2. Ефективність показників навантажувача базується на їх визначенні у вигляді розмірних і безрозмірних величин і на підставі порівнянь.
3. На основі ряду показників навантажувач ТО-24 встановлений як зразковий.
4. За створеною методикою отримана величина відносної економії палива для кожної машини порівняно з витратами палива для зразкового навантажувача.
5. Ця методика дозволяє формувати на підставі зразкових машини ефективні загони для виконання заданого об'єму робіт з мінімальними витратами палива.

Список використаних джерел

1. Технология, механизация и автоматизация строительства: учеб. для вузов по спец. «Экономика и упр. в стр-ве» / С. С. Атаев, В. А. Бондарик, И. Н. Громов и др.; под общ. ред. С. С. Атаева и С. Я. Луцкого. Москва: Высш. шк., 1990. 592 с.
2. Эксплуатация подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / А. В. Рубайлов, Ф. Ю. Керимов, В. Я. Дворковой и др.; под. ред. Е. С. Локшина. Москва: Издательский центр «Академия», 2007. 512 с.
3. Блохин В. С., Малич Н. Г. Машины для земляных работ, предпосылки повышения их конкурентоспособности: учеб. пособ. Днепропетровск: ИМА-пресс, 2005. 304 с.
4. Шмаров В. Д., Ремарчук Н. П. Методические указания по определению рационального состава экскаваторных отрядов в дорожном строительстве с применением ЭЦВМ «Мир-1» в курсовых и дипломных проектах (для студентов специальности 0511). Харьков: Ротапринт ХАДИ, 1978. 10 с.
5. Баранов О. П., Щока І. М. Математична модель оптимальної структури комплекту машин мобільних загонів механізації будівництва. *Збірник наукових праць Дніпровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика.* Дніпропетровськ: ДПТ, 2012. С. 18-21.
6. Учет и оценка эффективности использования каждой машины парка в строительстве / А. Н. Максименко, В. В. Кутузов, Г. С. Тимофеев, В. В. Васильев *Вестник Белорусско-Российского университета.* 2010. № 4(29). С. 21-29.
7. Демішкан В. Ф., Нічке В. В. Підвищення якості землерийно-транспортних машин. Харків: ХНАДУ, 2007, 272 с.
8. Вербицкий Г. М. Комплексная механизация строительства: текст лекций. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2006. 265 с.
9. Землеройно-транспортные машины: справочник / А. М. Холодов, В. В. Ничке, Л. В. Назаров. Харьков: Вища школа. Изд. при Харьк. ун-те, 1982. 192 с.
10. Panchenko S. V. Estimation of the State of Engine of Mobile Machines in the Conditions of Operation on Basis of Onboard Diagnostics. *International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2021. P. 1-6. DOI:10.1088/1757-899X/1021/1/012046.
11. Ремарчук М. П., Кебко О. В., Галицький О. О. Теоретичне обґрунтування ефективності машин для земляних робіт за даними їх технічних параметрів. *Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст», серія «Технічні науки та архітектура».* 2022. Т. 4. Вип. 171. С. 18-24.

Ремарчук Микола Парфенійович, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Тел.: +38 (057) 730-10-72. E-mail: remarchuk@ukr.net.

Чмуж Ярослав Валентинович, кандидат технічних наук, докторант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-1680-0021. Тел.: +38 (050) 303-40-17. E-mail: chmuzh@gmail.com.

Галицький Олег Олегович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9352-1352. Тел.: +38 (099) 072-77-45. E-mail: lietome1994@gmail.com.

Кебко Олександр Вікторович, асистент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6292-1505. Тел.: +38 (099) 034-76-07. E-mail: kebko.a@ukr.net.

Соболев Роман Євгенович, інженер, викладач вищої категорії Харківського державного автомобільно-дорожного коледжу. ORCID iD: 0000-0003-3284-6839. Тел.: +38 (098) 096-45-16. E-mail: mega143@ukr.net.

Remarchuk Mykola, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Tel.: +38 (057) 730-10-72. E-mail: remarchyk@ukr.net.

Chmuzh Yaroslav, PhD (Tech), PhD student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-1680-0021. Tel.: +38 (050) 303-40-17. E-mail: chmuzh@gmail.com.

Halytskyi Oleg, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9352-1352. Tel.: +38 (099) 072-77-45. E-mail: lietome1994@gmail.com.

Kebko Oleksandr, assistant, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6292-1505. Tel.: +38 (099) 034-76-07. E-mail: kebkko.a@ukr.net.

Sobolev Roman, engineer, teacher of the highest category, Kharkiv State Automobile and Road College. ORCID iD: 0000-0003-3284-6839. Tel.: +38 (098) 096-45-16. E-mail: mega143@ukr.net.

Статтю прийнято 13.09.2022 р.

УДК 620.92

АНАЛІЗ СТРУКТУР І ДИНАМІКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, аспіранти Д. А. Гордієнко, Г. А. Хоружевський, Р. О. Харін

ANALYSIS OF STRUCTURES AND DYNAMIC OF WIND GENERATOR CONTROL SYSTEMS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate students D. A. Hordiienko, H. A. Khoruzhevskyi, R. O. Kharin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267774>



***Анотація.** Подано динаміку розвитку альтернативних джерел живлення за останні декілька десятиліть, що дає підстави говорити про тенденції подальшого розвитку вітрової енергетики. За класифікацією міжнародного стандарту IEC 61400 наведено аналіз структур і технічних характеристик вітрових генераторів, а саме типи електричних двигунів, силові схеми напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують генерацію електричної енергії до загальнопромислової електричної мережі. Розглянуто питання можливості роботи вітрових генераторів у широких діапазонах вітру, питання емісії реактивної потужності та вищих гармонік струмів до загальнопромислової електричної мережі, а також питання ККД різних структур вітрогенераторів. Запропоновано систему керування вітровою турбіною з асинхронним генератором. Наведено дослідження перехідних процесів керування та енергетичної сумісності вітроустановки повного перетворення енергії з мережею живлення шляхом імітаційного комп'ютерного моделювання в програмному середовищі Matlab / Simulink. Отриманий результат вказує на принципову можливість роботи асинхронного генератора з короткозамкненим ротором у складі вітроустановки, що дає змогу віддавати потужність до мережі змінного струму при низьких швидкостях вітру.*

***Ключові слова:** асинхронний генератор, вітрова турбіна, вітроенергетика, електростанція, система керування.*

Abstract. *The dynamics of the development of alternative power sources over the past several decades are presented, which gives reason to talk about the trends in the further development of wind energy. An analysis of the structures and technical characteristics of wind generators classified according to the international standard IEC 61400 is given. According to the classification of the international standard IEC 61400, the structures of wind generators are presented, namely, types of electric motors, power circuits of semiconductor converters that provide the generation of electrical energy to the general industrial electrical network. The use of power electronics in various types of wind turbine generation systems and offshore wind farms provides improved wind turbine performance. Semiconductor converters are used in frequency and voltage control to regulate active and reactive powers. The issue of the possibility of operation of wind generators in wide wind ranges, the issue of emission of reactive power and higher harmonics of currents to the general industrial electrical network, as well as the issue of efficiency of various structures of wind generators are considered. A wind turbine control system with an asynchronous generator is proposed. A study of transient control processes and energy compatibility of a full energy conversion wind turbine with a power supply network by simulation computer modeling in the Matlab / Simulink software environment is given. The obtained result indicates the fundamental possibility of operation of an asynchronous generator with a short-circuited rotor as part of a wind turbine operating in conditions of variable wind speed. The proposed layout of the wind turbine with full energy conversion allows power to be delivered to the AC grid at a variable frequency of rotation of the wind motor shaft, which allows to increase the control range and maximize the generated power at low wind speeds.*

Keywords: *asynchronous generator, wind turbine, wind energy, power plant, control system.*

Вступ. Енергія вітру є актуальним і перспективним видом відновлюваних видів енергії. Станом на 2020 рік було встановлено 93 ГВт нових потужностей, що на 53 % більше порівняно з показниками 2019 року. У 2020 році рекордне зростання було обумовлене сплеском установок у Китаї та США – двох найбільших світових ринках вітроенергетики, які разом встановили майже 75 % нових установок у 2020 році, що склало понад половину всієї світової вітроенергетики. У 2020 році загальна встановлена потужність усіх вітрогенераторів становила 743 ГВт, що перевищило сумарну встановлену потужність атомної енергетики (проте на практиці використана в середньому за рік потужність вітрогенераторів у кілька разів нижче встановленої потужності, у той час як атомна електростанція майже завжди працює в режимі встановленої потужності). У 2019 році кількість електричної енергії, виробленої всіма вітрогенераторами світу,

склала 1430 ТВт·год (5,3 % всієї виробленої людством електричної енергії) [1, 2].

З 2014 року 85 країн світу використовують вітроенергетику на комерційній основі. Великі вітрові електростанції включаються до загальної мережі, дрібніші використовуються для постачання електрики до віддалених районів. На відміну від викопного палива, енергія вітру практично невичерпна, повсюдно доступна та більш екологічна [3, 4]. Деякі країни особливо інтенсивно розвивають вітроенергетику. За даними WindEurope, у 2019 році в Данії за допомогою вітрогенераторів було вироблено 48 % усієї електрики, в Ірландії – 33 %, Португалії – 27 %, Німеччині – 26 %, Великобританії – 22 %, Іспанії – 21 %, Європейському Союзу загалом – 15 % [5].

Отже, кількість електроенергії, що генерується вітровою енергетикою, за останні роки експоненціально зростає (рис. 1).

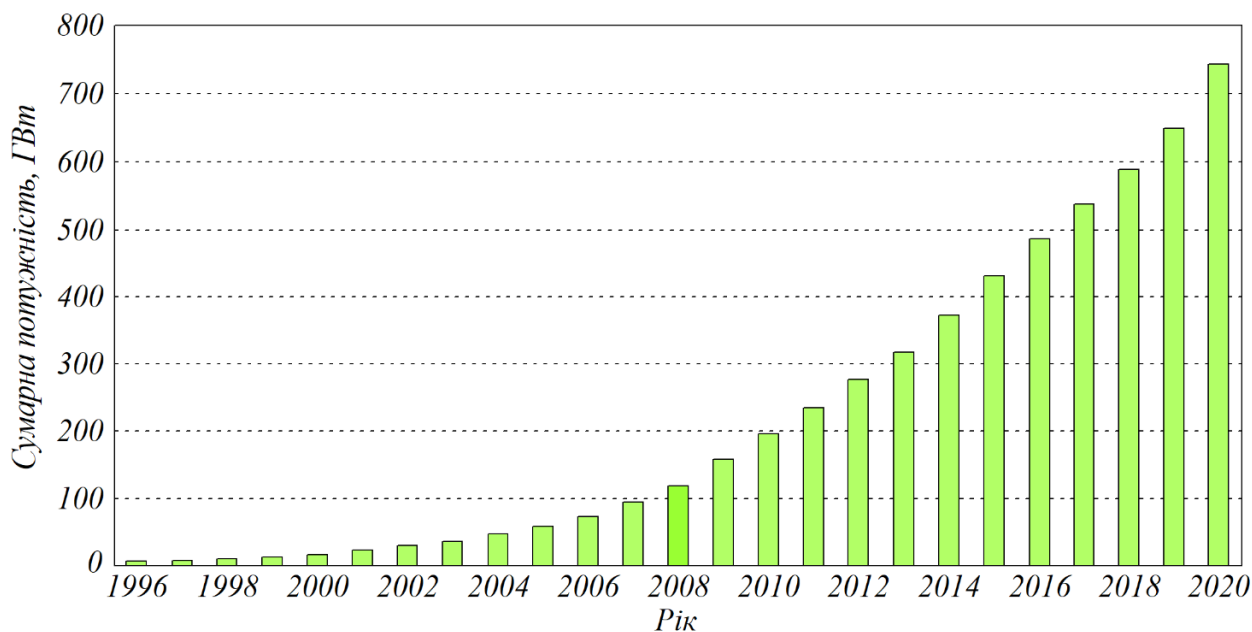


Рис. 1. Динаміка зростання вітрової енергетики

Спорудження вітрових електростанцій пов'язане з деякими труднощами технічного та економічного характеру, що уповільнюють поширення вітроенергетики. Зокрема, мінливість вітрових потоків не створює проблем при невеликій частці вітроенергетики в загальному виробництві електроенергії, проте при зростанні цієї частки збільшуються також і проблеми надійності виробництва електроенергії. Для вирішення подібних проблем використовується інтелектуальне керування розподіленням електроенергії. Завданням системи перетворення вітрових електростанцій є формування синусоїдальних вихідних напруг зі стабільною амплітудою та частотою. Для формування синусоїдальної вихідної напруги можна використовувати різні типи напівпровідникових перетворювачів, а також різні системи керування [6, 7].

Робота продовжує дослідження, проведені в попередні роки, і базується на науковому доопрацюванні та результатах, частково опублікованих у роботах [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Велика частина вітрових турбін використовує систему DFIG (асинхронні

генератори з подвійним живленням), що дає змогу генерувати електроенергію зі змінною швидкістю. Роботи [10, 11] з DFIG зробили внесок у керування вітровими системами (керування зворотним кроком, режимом ковзання, MPPT, моделлю PCHD, D-FOC). Основний недолік такого керування полягає в тому, що для синтезу воно ґрунтується на строгому математичному аспекті.

У роботі [12] запропоновано використання системи передачі постійного струму високої напруги (HVDC), що має технічні переваги у створенні асинхронного з'єднання та масового постачання електроенергії на великі відстані. Зростаюча кількість проєктів HVDC у всьому світі показує, що технологія HVDC відіграє все більш важливу роль у світовій системі передачі електроенергії. Однак до недоліків такої системи слід віднести велику вартість при побудові системи. Побудувати перетворювальну станцію набагато дорожче, ніж звичайну підстанцію змінного струму аналогічної потужності, оскільки для кращих технічних характеристик системи HVDC потрібно набагато більше компонентів. При цьому збільшується кількість гармонік, що впливають на якість

електроенергії та можуть призвести до коливань системи.

Метод ПД-регулювання, запропонований у роботі [13], забезпечує бажану поведінку замкненої системи таким чином, щоб отримати максимальну вихідну потужність і досягти зменшення структурних навантажень і втоми. Однак не враховується коливання башт. Тому в цій ситуації необхідна модель вітряної турбіни з розподіленими параметрами та опис з точки зору розподілу маси та жорсткості.

Отже, завдання визначення оптимального компонування та системи керування вітроустановки з повним перетворенням енергії є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є аналіз впливу системи керування вітровою турбіною з асинхронним генератором на енергетичні показники вітроустановки, що дасть можливість віддавати потужність до мережі змінного струму при низьких швидкостях вітру. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– порівняння можливих топологій вітрових електростанцій та ефективності застосування вітроустановок з різним компонуванням;

– дослідження перехідних процесів керування та енергетичної сумісності вітроустановки повного перетворення енергії з мережею живлення.

Основна частина дослідження.
Керування вітровою турбіною. Керування вітровою турбіною включає як швидко, так і повільну динаміку керування. Загалом потужність має контролюватися за допомогою аеродинамічної системи та реагувати на задане значення (або диспетчерським центром, або локально) з метою максимізації виробництва енергії на основі доступної енергії вітру. Контролер потужності також повинен мати можливість обмежувати потужність [14].

При керуванні вітроенергетичною установкою з генераторною системою

подвійного живлення вітрова турбіна зазвичай змінюватиме швидкість пропорційно швидкості вітру і підтримуватиме фіксований кут нахилу. За дуже слабкого вітру швидкість турбіни буде зафіксовано на максимально допустимому ковзанні, щоб не було перенапруги. Контролер кута нахилу обмежує потужність, коли турбіна досягає номінальної потужності. Генерована електроенергія виробляється за рахунок керування генератором з подвійним живленням через перетворювач на боці ротора. Керування перетворювачем з боку мережі просто підтримує фіксовану напругу постійного струму. В обох перетворювачах використовуються внутрішні контури струму, які зазвичай є лінійними П-регуляторами. Перетворювачі потужності на боці мережі та боці ротора є перетворювачами джерела напруги [15, 16].

Іншим рішенням для керування електричною потужністю є використання багатополосного синхронного генератора [17, 18]. Подібна система дуже широко використовується в промисловості. Пасивний випрямляч і підвищувальний перетворювач використовуються для підвищення напруги на низькій швидкості. Мережевий інвертор взаємодіє з проміжною ланкою постійного струму.

Загальним для обох систем є те, що вони здатні керувати активною та реактивною потужністю в мережі з високою динамікою.

Конфігурації вітрової електростанції. У багатьох країнах енергетичне планування здійснюється з високим проникненням енергії вітру, що забезпечується великими вітровими електростанціями. Ці вітрові електростанції можуть у майбутньому зробити значний внесок у національну енергосистему і, отже, відіграти важливу роль у забезпеченні якості електроенергії та керуванні складними енергосистемами. Тому до генеруючих установок висуваються дуже високі технічні вимоги, такі як керування

частотою і напругою, регулювання активної та реактивної потужності, швидке реагування на перехідні та динамічні ситуації енергосистеми, наприклад зниження потужності від номінальної до 20 % потужності протягом 2 с [19, 20].

Технологія силової електроніки є важливою частиною як конфігурації системи, так і в керуванні морським вітром. Одна морська вітрова електростанція, оснащена силовими електронними перетворювачами, може здійснювати керування як активною, так і реактивною

потужністю, а також керувати вітровими турбінами зі змінною швидкістю, щоб максимізувати корисну енергію і знизити механічну напругу та акустичний шум [21, 22]. Подібне рішення експлуатується в Данії як морська вітроелектростанція потужністю 160 МВт (рис. 2).

Вітроелектростанції на базі вітроустановки типу А безпосередньо підключені до мережі. У точці підключення використовується блок компенсації реактивної потужності, як наведено на рис. 3.

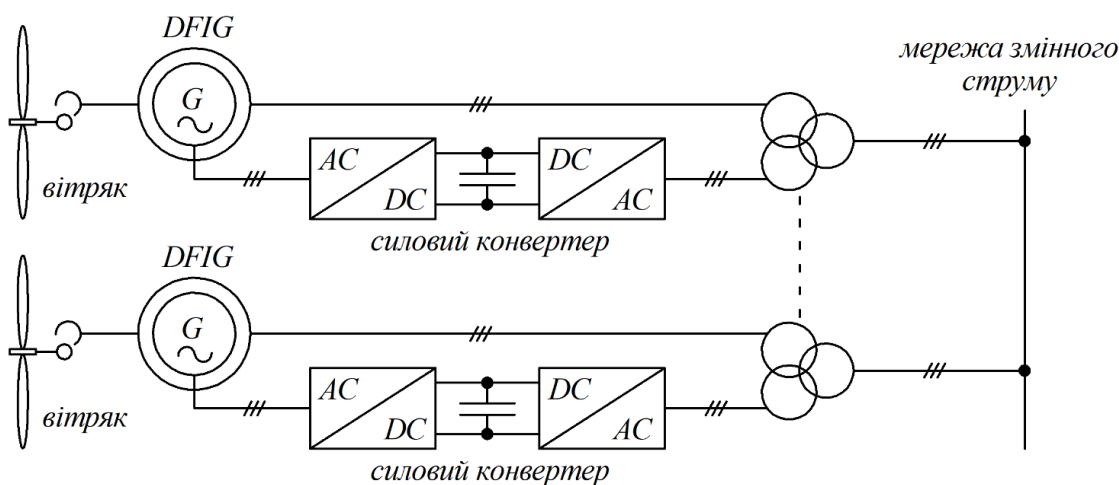


Рис. 2. Вітрова електростанція на базі DFIG з підключенням до мережі змінного струму (вітроустановка типу А)

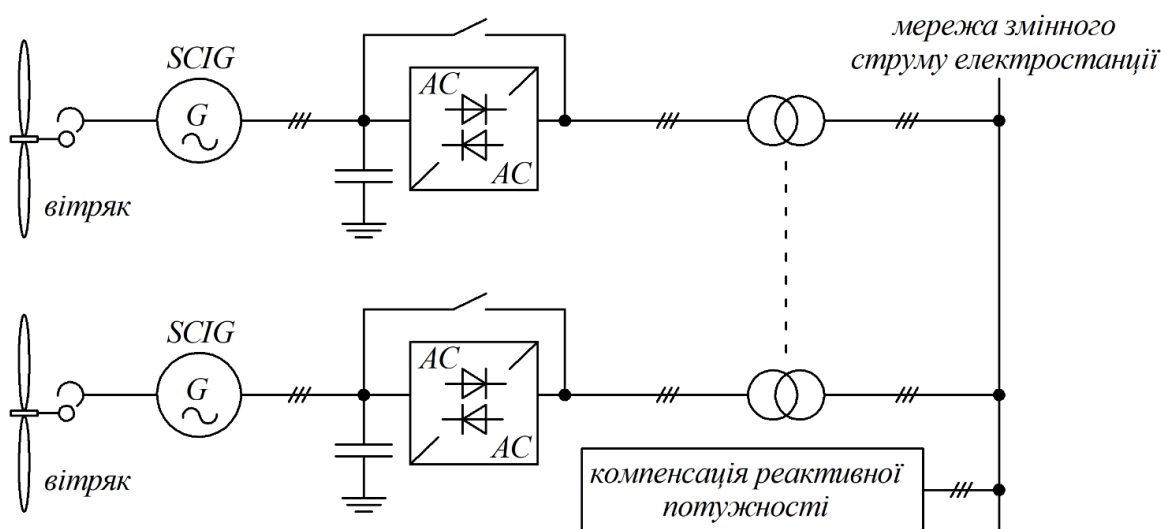


Рис. 3. Активна вітрова електростанція з підключенням до мережі змінного струму (вітроустановка типу В)

Для передачі електроенергії на великі відстані від морської вітрової електростанції цікавим варіантом може бути система HVDC [23, 24]. У системі передачі HVDC низька або середня змінна напруга на вітровій електростанції перетворюється на високу постійну напругу на боці передачі, а потужність постійного струму передається в берегову систему, де постійна напруга перетворюється на змінну напругу (рис. 4). Топологія може навіть дати змогу змінювати швидкість вітрових турбін всієї вітрової електростанції.

Іншу можливу конфігурацію системи передачі постійного струму наведено на рис. 5, де кожен вітрогенератор має свій власний силовий електронний перетворювач, що дає змогу експлуатувати кожен вітрогенератор з індивідуальною оптимальною швидкістю. На вітровій електростанції є загальна мережа постійного струму, а для підключення до берегової мережі використовується повномасштабний перетворювач енергії [25, 26].

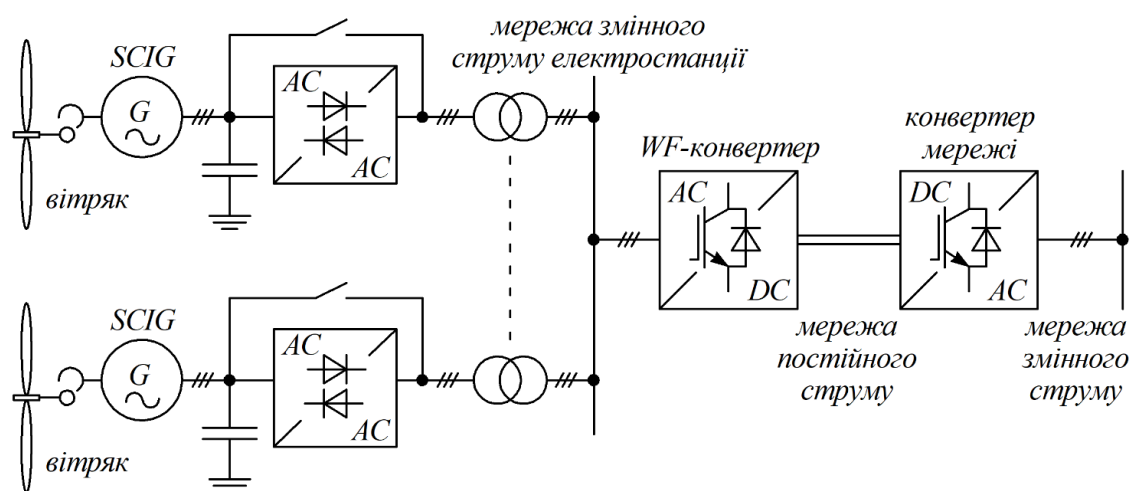


Рис. 4. Активна вітрова електростанція з підключенням до мережі постійного струму (вітроустановка типу С)

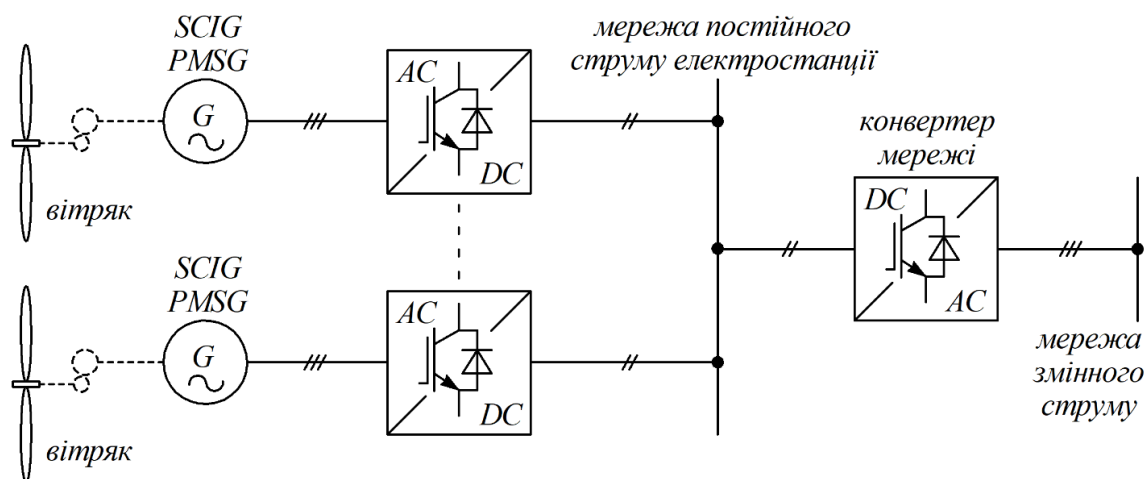


Рис. 5. Вітроелектростанція з загальною мережею постійного струму на базі вітрогенераторів зі змінною швидкістю обертання та повномасштабним перетворювачем потужності (вітроустановка типу D)

Порівняння можливих топологій вітрових електростанцій наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, вітрові електростанції мають цікаві особливості, щоб діяти як джерело енергії в мережі. Деякі мають

кращі характеристики, ніж інші. Суть завжди зводиться до сукупних витрат, включаючи виробництво, інвестиції, технічне обслуговування та надійність.

Таблиця 1

Порівняння топологій вітрових електростанцій

Параметр	Вітроустановка			
	тип А	тип В	тип С	тип D
Індивідуальний контроль швидкості	так	ні	так	ні
Електронне керування активною потужністю	так	ні	так	так
Контроль реактивної потужності	так	центра-лізований	так	так
Коротке замикання (активне)	частково	частково	ні	ні
Потужність короткого замикання	сприяє	сприяє	ні	ні
Контроль пропускної спроможності	10 мс ... 100 мс	200 мс ... 2 с	10 мс ... 100 мс	10 мс ... 10 с
Функція очікування	так	ні	так	так
Пристрій плавного пуску	ні	так	ні	ні
Пропускна спроможність до мережі	так	частково	так	так
Надмірність	так	так	ні	ні

Вимоги підключення до мережі.

Деякі європейські країни наразі мають спеціальні мережеві коди для вітроенергетики. Ці вимоги здебільшого відображують впровадження енергії вітру в електричну мережу.

Вимоги до вітроенергетики охоплюють широкий діапазон рівнів напруги від середньої до дуже високої напруги. Мережеві коди для вітрової енергії вирішують проблеми, які змушують вітрові електростанції діяти як звичайні електростанції в електричній мережі. Ці вимоги зосереджені на керованості, якості електроенергії, можливості усунення несправностей і підтримці мережі під час збоїв [27, 28].

Регулювання активної потужності.

Відповідно до вимог вітрові турбіни мають

бути здатними керувати активною точкою загального з'єднання в заданому діапазоні потужностей. Активна потужність зазвичай регулюється з урахуванням частоти системи, щоб потужність, що подається до мережі, зменшувалась, коли частота мережі перевищувала 50 Гц. Так, наприклад, типову характеристику регулювання частоти для вітрових турбін, підключених до мережі в Данії, наведено на рис. 6.

Навпаки, інші коди мережі, наприклад у Великобританії, вказують на те, що активна вихідна потужність має підтримуватися сталою для діапазону частот від 49,5 до 50,5 Гц. Падіння потужності, що віддається, допускається не більш ніж на 5 % при зниженні частоти до 47 Гц.

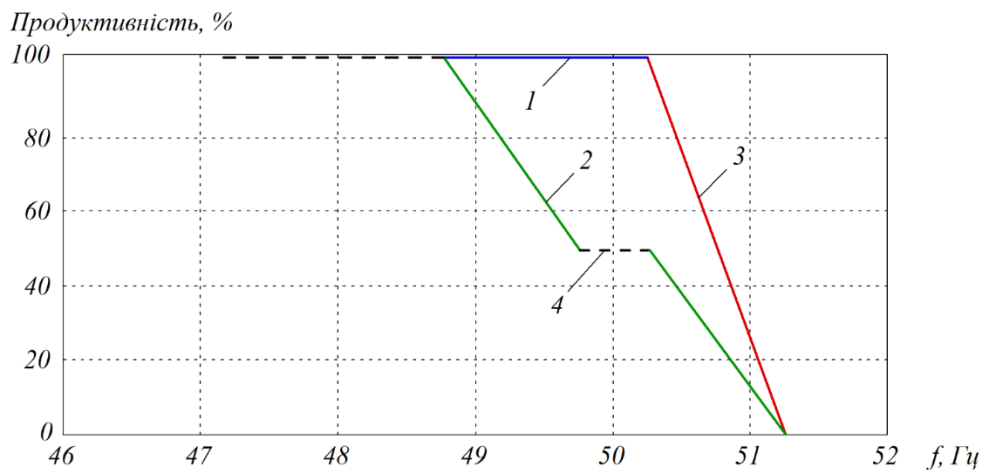


Рис. 6. Характеристика регулювання частоти для вітрових турбін:
 1 – можлива продуктивність; 2 – з 50 % знижувальним регулюванням;
 3 – без знижувального регулювання; 4 – мертва зона

У Данії висуваються найвищі вимоги до керованості електроенергії, що виробляється. Вітрові електростанції, підключені на рівні передачі, мають діяти як звичайні електростанції, забезпечуючи широкий діапазон керування вихідною потужністю на основі вимог оператора системи передачі, а також участь у первинному і вторинному керуванні. Для

керування вітровою електростанцією потрібні сім функцій регулювання. Серед таких пріоритетних функцій регулювання активної потужності, реалізованих у контролері вітрової електростанції відповідно до вимог мережевих норм, мають бути такі: дельта-контроль, контроль балансу, абсолютна продуктивність і захист системи (рис. 7).

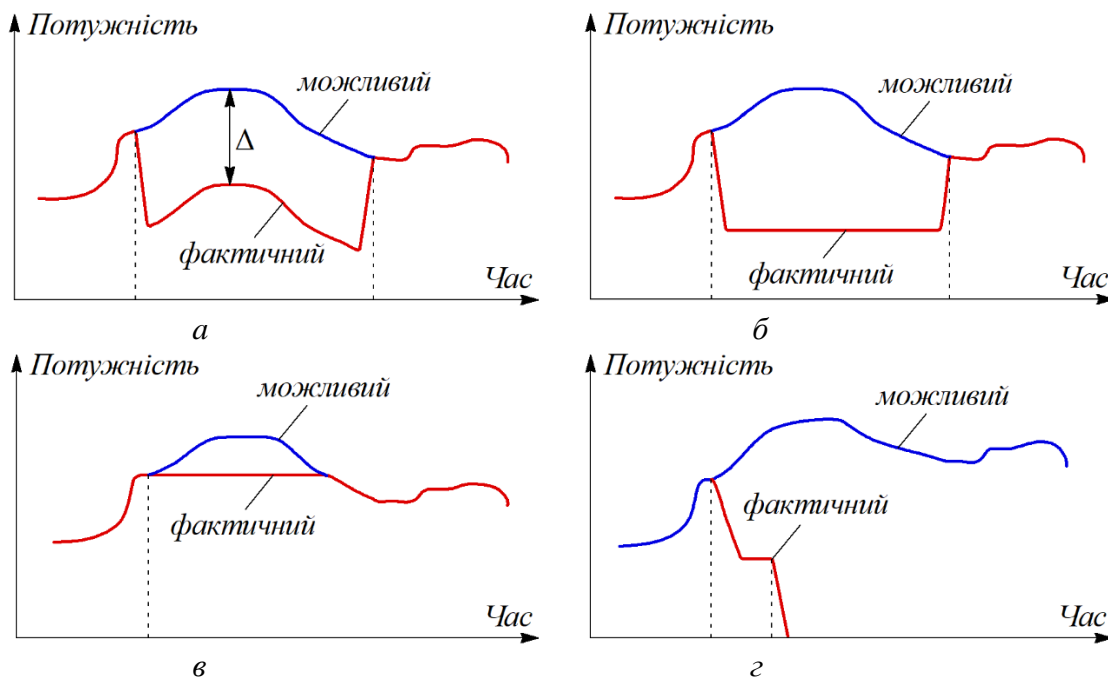


Рис. 7. Функції регулювання активної потужності:
 а – дельта-контроль; б – контроль балансу; в – абсолютна продуктивність; г – захист системи

Контроль реактивної потужності і стабільність напруги. Реактивна потужність зазвичай регулюється в заданому діапазоні. Коди мережі по-різному визначають цю можливість керування. Наприклад, датський мережевий кодекс визначає діапазон керування реактивною

потужністю з урахуванням вихідної активної потужності (рис. 8).

Ірландський мережевий кодекс визначає вимоги до регулювання реактивної потужності для вітрових турбін з урахуванням коефіцієнта потужності (рис. 9).

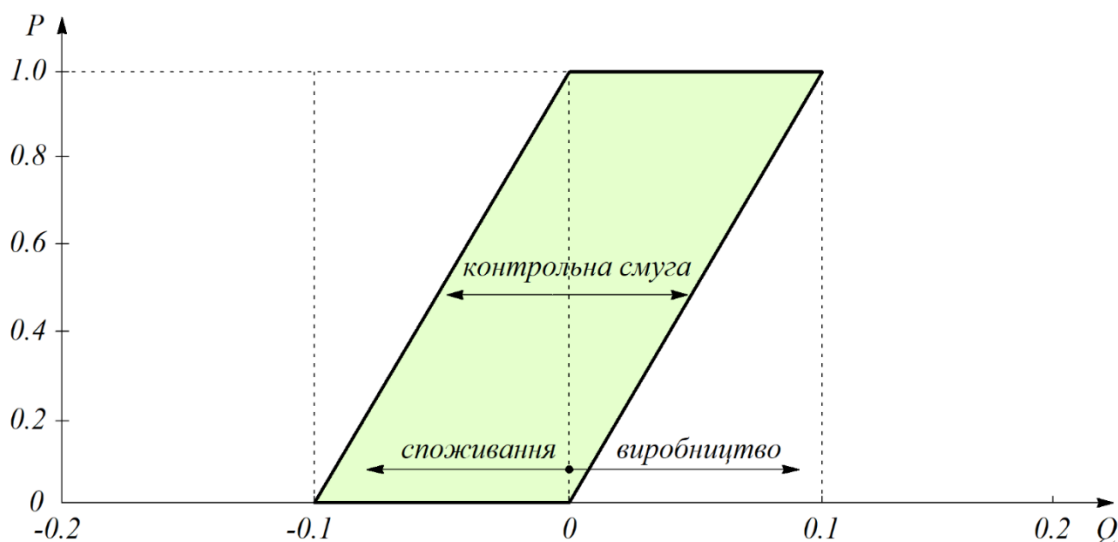


Рис. 8. Діапазон керування реактивною потужністю

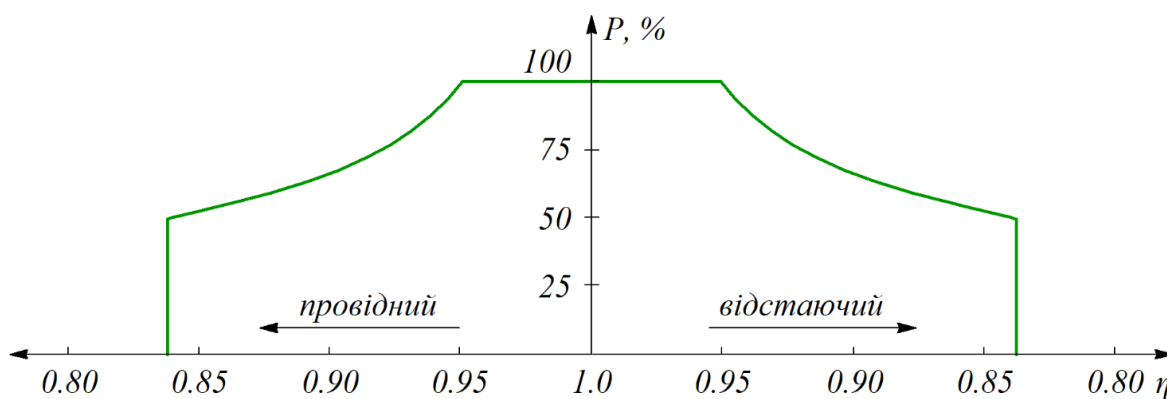


Рис. 9. Вимоги до регулювання реактивної потужності

У німецькому стандарті мережі передачі вітрової енергії зазначено, що вітроенергетичні установки мають забезпечувати подачу реактивної

потужності в точці підключення без обмеження вихідної активної потужності (рис. 10).

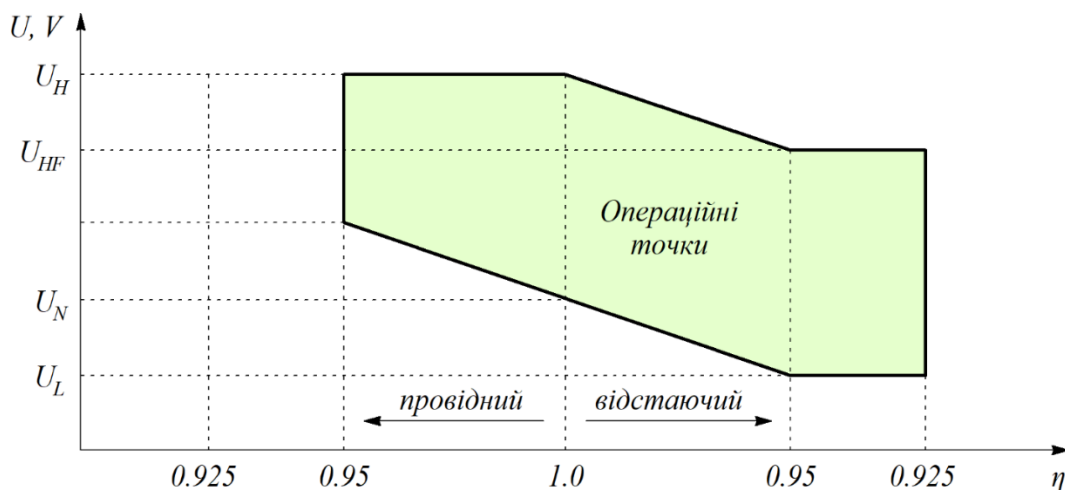


Рис. 10. Вимоги до забезпечення реактивною потужністю генеруючих установок без обмеження вироблення активної потужності

Якість електроенергії. Питання якості електроенергії вирішуються насамперед для вітрових турбін, підключених до мереж середньої напруги [29, 30]. У Данії та Ірландії також є вимоги на рівні передачі. В основному використовуються два стандарти для визначення параметрів якості електроенергії, а саме ІЕС 61000-х-х та EN 50160. Конкретні значення наводяться для швидких змін напруги, сили короткострокового мерехтіння, сили

довготривалого мерехтіння та загального гармонічного спотворення.

Пропускна спроможність системи. Усі розглянуті мережні норми вимагають можливості усунення несправностей для вітрових турбін. Одна з проблем полягає в тому, що розрахунок напруги при всіх типах несиметричних замикань не дуже чітко визначено в деяких мережевих нормах. Профіль напруги для стійкості до несправностей у європейських мережевих нормах для вітроенергетики наведено на рис. 11.

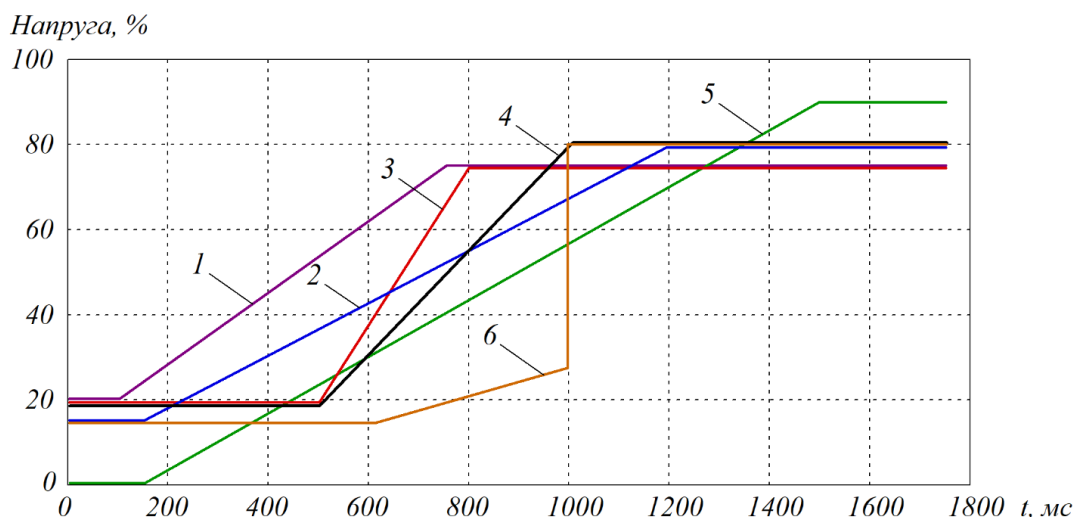


Рис. 11. Профіль напруги для стійкості до несправностей у європейських мережевих нормах: 1 – Данія (< 100 кВ); 2 – Великобританія (> 110 кВ); 3 – Італія (< 30 кВ); 4 – Іспанія (> 100 кВ); 5 – Німеччина (> 100 кВ); 6 – Ірландія (< 110 кВ)

Мережевий кодекс Ірландії дуже вимогливий щодо тривалості короткого замикання, тоді як у Данії найнижча тривалість короткого замикання лише 100 мс. Проте мережевий кодекс Данії вимагає, щоб вітрова турбіна залишалася підключеною до електричної мережі під час

послідовних збоїв, що є технічною проблемою.

З іншого боку, у Німеччині та Іспанії потрібна підтримка мережі під час короткого замикання за рахунок подачі реактивного струму до 100 % номінального, як наведено на рис. 12.

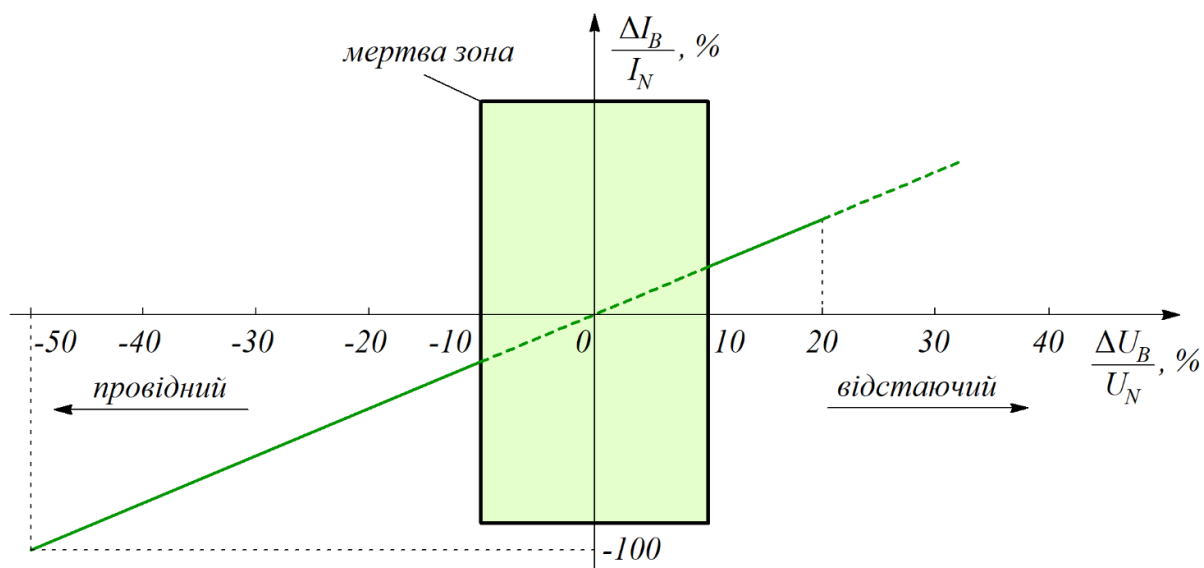


Рис. 12. Підтримка реактивного струму під час аварій

Таку вимогу важко задовольнити за допомогою деяких концепцій вітрових турбін, наприклад вітрова турбіна з активною зупинкою та безпосередньо підключеним до мережі асинхронним

генератором із короткозамкненим ротором (WT Type A).

Короткий виклад вимог до підключення вітрових електростанцій у Європі наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Огляд вимог до підключення для вітроенергетики

Параметр	Данія	Ірландія	Німеччина	Велико-британія	Іспанія	Італія
1	2	3	4	5	6	7
Рівень напруги	TS	DS (TS)	TS (DS)	TS (DS)	TS	> 35 кВТ
Рівень потужності	всі	≥ 5 МВт	всі	всі	всі	> 10 МВт
Допуск на діапазон частот	так	так	так	так	–	так
Частота	Контроль частоти	всі	всі	всі	всі	> 25 МВт
	Скорочення енергії, МВт	20...100 % P_r	так	так	–	–
	Максимальна підвищувальна швидкість	10...100 % P_r / \min	1...30 МВт/хв	так	–	–

Продовження табл. 2

1		2	3	4	5	6	7
Напруга	Контроль напруги	ні	так	ні	ні	–	ні
	Контроль реактивної потужності	так	так	так	так	–	так
Якість напруги	Швидкість зміни напруги	$\leq 3 \%$	–	$\leq 2 \%$	$\leq 3 \%$	–	EN 50160
	Інтенсивність короткотривалого мерехтіння	$\leq 0,3$	$\leq 0,35$	–	$\leq 0,8$	–	EN 50160
	Інтенсивність довготривалого мерехтіння	$\leq 0,2$	$\leq 0,35$	$\leq 0,46$	$\leq 0,6$	–	EN 50160
	Рівні гармонічної сумісності	–	конкретні рівні	EN 50160	IEC 61000-3-2	–	EN 50160
	THD	$\leq 1,5 \%$	$\leq 1,5 \%$	$\leq 8 \%$	N / A	–	EN 50160
Прохідна несправність	Тривалість несправності	100 мс	625 мс	150 мс	140 мс	500 мс	500 мс
	Мінімальна напруга	$25 \% U_r$	$15 \% U_r$	$0 \% U_r$	$15 \% U_r$	$20 \% U_r$	$20 \% U_r$
	Час відновлення	1 с	3 с	1,5 с	1,2 с	1 с	0,3 с
	Профіль напруги	1, 2, 3-ph	1, 2, 3-ph	загальний	загальний	загальний	загальний
	Введення реактивного струму	ні	ні	$> 100 \%$	ні	$> 100 \%$	ні
Сигнали, зв'язок і керування	Доступність	так	так	так	так	–	так
	Вихідна активна потужність	так	так	так	так	–	так
	Вихідна реактивна потужність	так	так	так	так	–	так
	Скорочення енергії МВт	так	так	так	так	–	–
	Регулювання частоти	так	так	так	так	–	–
	Стан автоматичного вимикача	так	так	так	так	–	так
	Метеорологічні дані: швидкість вітру, напрям вітру, атмосферний тиск і температура	так	так	–	–	–	так

Програмне моделювання імітаційної моделі вітроустановки. Для оцінювання ефективності застосування вітроустановок того чи іншого компоновання вимагає проведення досліджень перехідних процесів керування та енергетичної сумісності з мережею. У програмному середовищі

Matlab/Simulink було розроблено імітаційну модель вітроустановки з повним перетворенням енергії потужністю 120 кВт (рис. 13). Така вітроустановка належить до класу середньої потужності та найчастіше використовується з асинхронним генератором.

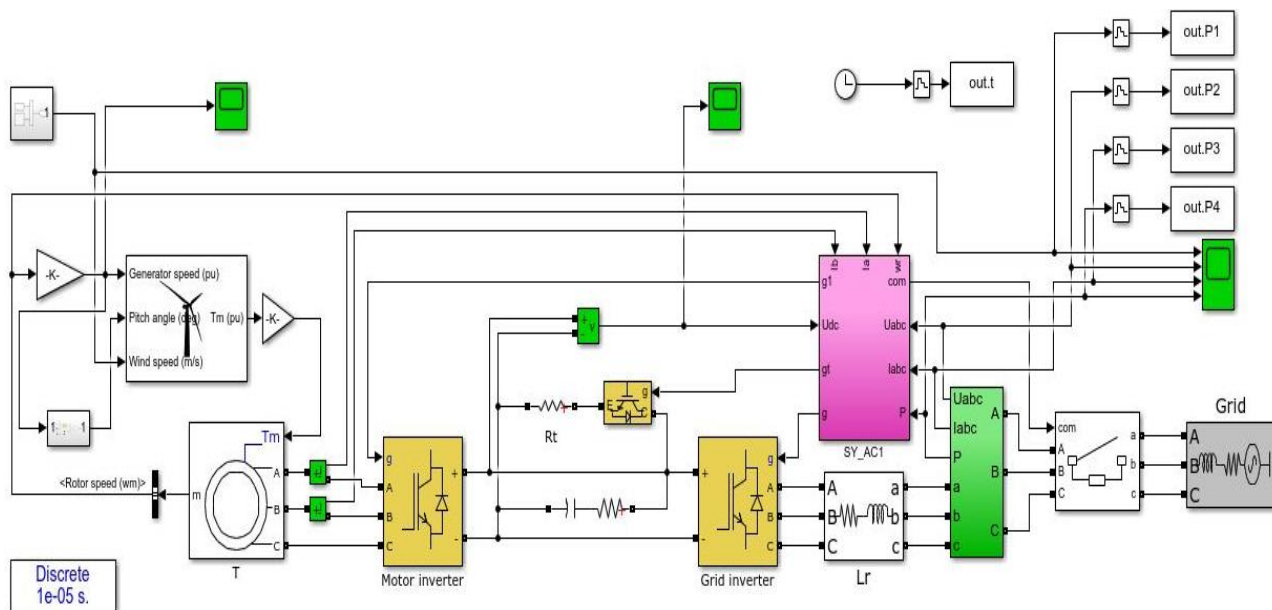


Рис. 13. Зовнішній вигляд імітаційної моделі вітроустановки з повним перетворенням енергії

Імітаційна модель вітроустановки складається з турбіни потужністю 130 кВт, асинхронного генератора потужністю 110 кВт, двох інверторів – збудження та мережевого, блока керування та мережі. Таке компонування дає змогу віддавати потужність до мережі змінного струму при непостійній частоті обертання вала вітродвигуна, що забезпечує збільшення діапазону керування та використання вітроустановки при низьких швидкостях вітру. Використання асинхронного генератора пов'язане з його низькою вартістю і великою надійністю, що є важливими параметрами для установок малої та середньої потужності.

У рамках імітаційної моделі робота вітроустановки полягає в перетворенні механічної енергії вітродвигуна, що реалізований за допомогою блока «Wind Turbine». Слід зауважити, що цей блок не враховує момент інерції вітродвигуна, тому його слід враховувати в імітаційній моделі асинхронного генератора. Інвертор збудження асинхронного генератора

реалізований блоком «Motor inverter», керується за допомогою просторово-векторної модуляції та забезпечує керування асинхронним генератором.

З'єднання з мережею змінного струму забезпечується за рахунок блока «Grid inverter». Мережевий інвертор перетворює енергію кола постійного струму в енергію змінного струму для передачі її до мережі з параметрами, що регламентовані вимогами до якості електричних мереж.

Систему керування асинхронним генератором побудовано за частотно-струмовим принципом, що є достатнім, оскільки у схемі використовується датчик частоти обертання генератора. Частоту комутації напівпровідникових вентилів прийнято на рівні 2 кГц.

У разі втрати з'єднання з мережею (обрив лінії або аварійне відключення) у схемі передбачено гальмівний резистор «Rt».

Результат моделювання роботи вітроустановки при зміні швидкості з 4 до 6 м/с наведено на рис. 14.

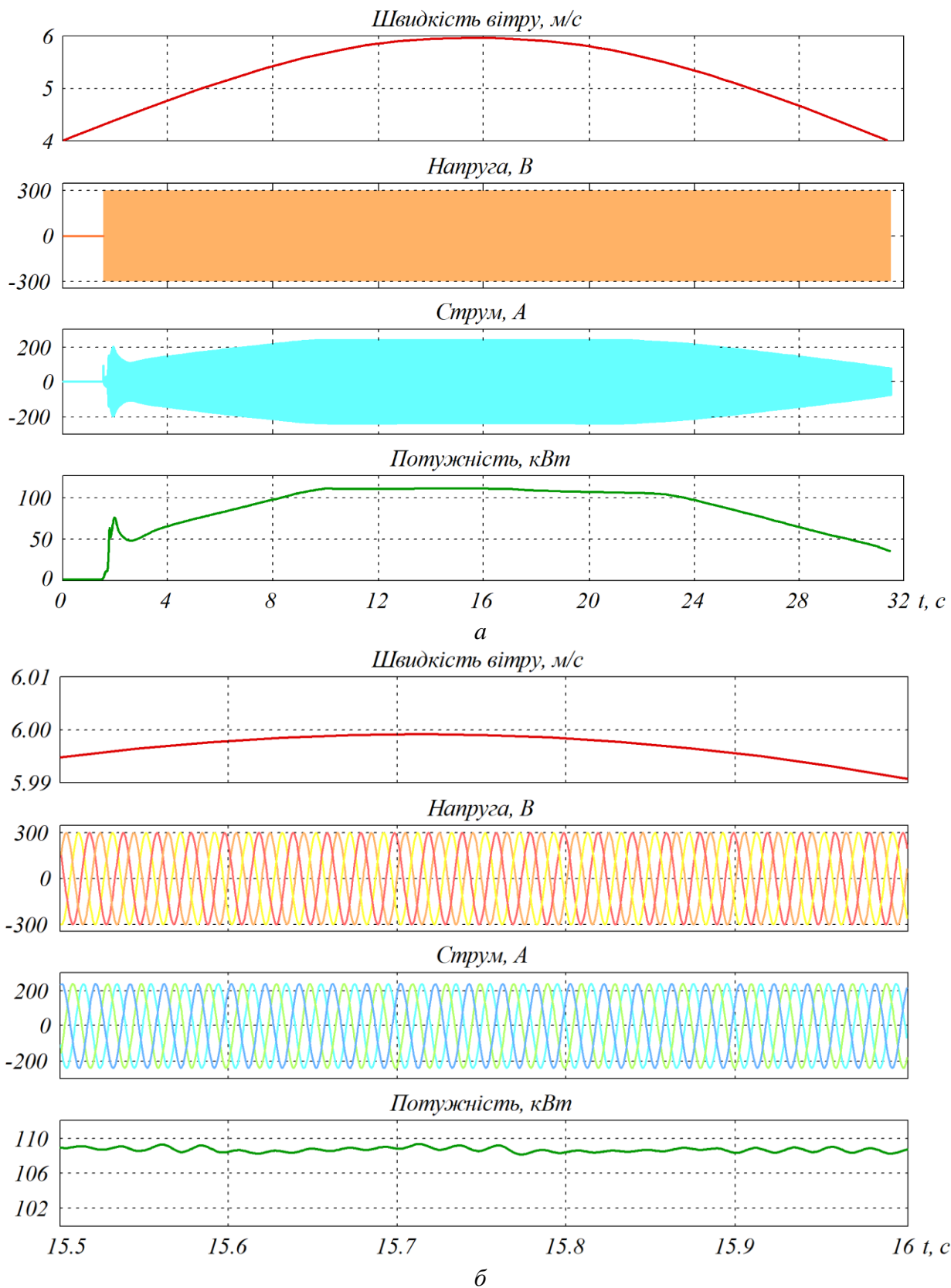


Рис. 14. Перехідний процес роботи вітроустановки: а – повний цикл при зміні швидкості з 4 до 6 м/с; б – масштабований процес при досягненні 6 м/с

Отриманий результат вказує на принципову можливість роботи асинхронного генератора з короткозамкненим ротором у складі вітроустановки, що працює в умовах змінної швидкості вітру. Це може бути використано для розроблення алгоритму керування вітроустановкою, що дасть змогу максимізувати вироблену потужність.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– проведено порівняння структур і технічних характеристик вітрових генераторів відомих електростанцій. Найбільш ефективним є компонування вітроустановки з асинхронним генератором;

– запропоноване компонування вітроустановки з повним перетворенням енергії дає змогу віддавати потужність до мережі змінного струму при непостійній частоті обертання вала вітрогенератора, що забезпечує збільшення діапазону керування та використання вітроустановки при низьких швидкостях вітру.

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. Ortega Izquierdo M., Del Rio P. An analysis of the socioeconomic and environmental benefits of wind energy deployment in Europe. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 160. P. 1067–1080. DOI: 10.1016/j.renene.2020.06.133.
2. Fouad A., Alali Ch., Gainullina L. Increasing the efficiency of wind farms. *iPolytech Journal*. 2022. Vol. 26. P. 217–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-2-217-227.
3. Muhammad Shahzad N., Nisar A., Muhammad B., Hafiz M. N. Potential environmental impacts of wind energy development. *A global perspective. Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2020. Vol. 13. P. 85–90. DOI: 10.1016/j.coesh.2020.01.002.
4. Chaudhuri A., Datta R., Kumar M. P., Davim J. P., Pramanik S. Energy Conversion Strategies for Wind Energy System: Electrical, Mechanical and Material Aspects. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 3, 1232. P. 1–36. DOI: 10.3390/ma15031232.
5. Watson S., Moro A., Reis V., Baniotopoulos C., Barth S., Bartoli G., Bauer F. Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 113, 109270. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109270.
6. 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.
7. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
8. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy 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.
9. 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.

10. Hamiani H., Abdellah M., Tadjeddine A., Abdelkader B., Salim R. A wind turbine sensorless automatic control systems, analysis, modelling and development of IDA-PBC method. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 45–55. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp45-55.

11. Stock S., Babazadeh D., Becker C. Applications of Artificial Intelligence in Distribution Power System Operation. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 150098–150119. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3125102.

12. Zhao Q., Garcia-Gonzalez J., Garcia-Cerrada A., Renedo J., Rouco L. HVDC in the Future Power Systems. *Transmission Expansion Planning: The Network Challenges of the Energy Transition*. 2020. P. 117–151. DOI: 10.1007/978-3-030-49428-5_6.

13. Cao D., Hu W., Zhao J., Zhang G., Zhang B., Liu Z., Chen Z., Blaabjerg F. Reinforcement learning and its applications in modern power and energy systems: A review. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2020. Vol. 8, No. 6. P. 1029–1042.

14. Ohya Y., Karasudani T., Nagai T., Watanabe K. Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond. *Renew. Energy Environ. Sustain*. 2017. Vol. 2. P. 1–6. DOI: 10.1051/rees/2016022.

15. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy 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.

16. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Scherbak Ya., Mashura A., Khomenko I. Energy efficiency criterion of power active filter in a three-phase network. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 165–170. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250073.

17. Chumack V., Tsyvinskyi S., Kovalenko M., Ponomarev A., Tkachuk I. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. P. 30–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193495.

18. Devederkin I., Nikitenko G., Konoplev E., Edakaev A. Device of synchronous generator with increased magnetic efficiency for use in wind power plants with capacity of up to 5 kW. *Engineering for Rural Development*. 2021. P. 1672–1678. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF363.

19. Hasan A., Elgammal T., Jackson R., Amano R. Comparative Study of the Inline Configuration Wind Farm. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019. Vol. 142, No. 6. P. 1–23. DOI: 10.1115/1.4045463.

20. Alhadj Hassan F., Alali Ch., Gainullina L. Increasing the efficiency of wind farms. *iPolytech Journal*. 2022. Vol. 26. P. 217–227. DOI: 10.21285/1814-3520-2022-2-217-227.

21. Wisatesajja W., Roynarin W., Intholo D. Comparing the effect of rotor tilt angle on performance of floating offshore and fixed tower wind turbines. *J. Sustain. Dev*. 2019. Vol. 12. P. 84–95. DOI: 10.5539/jsd.v12n5p84.

22. Hand B., Cashman A. A review on the historical development of the lift-type vertical axis wind turbine: From onshore to offshore floating application. *Sustain. Energy Technol. Assess*. 2020. Vol. 38, 100646. DOI: 10.1016/j.seta.2020.100646.

23. Ryndzionek R., Sienkiewicz L. Evolution of the HVDC Link Connecting Offshore Wind Farms to Onshore Power Systems. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 8, 1914. P. 1–17. DOI: 10.3390/en13081914.

24. Korompili A., Wu Q., Zhao H. Review of VSC HVDC connection for offshore wind power integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1405–1414. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.064.

25. Thangavelu S. K., Wan T. G., Piraiarasi C. Flow simulations of modified diffuser augmented wind turbine. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 886, 012023. P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899x/886/1/012023.
26. Joshi N., Sharma J. Analysis and Control of Wind Power Plant. *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. 2020. P. 412–415. DOI: 10.1109/ICECA49313.2020.9297620.
27. Torres-Madronero J. L., Alvarez-Montoya J., Restrepo-Montoya D., Tamayo-Avendano J. M., Nieto-Londono C., Sierra-Perez J. Technological and operational aspects that limit small wind turbines performance. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 22, 6123. DOI: 10.3390/en13226123.
28. Bechtle P., Schelbergen M., Schmehl R., Zillmann U., Watson S. Airborne wind energy resource analysis. *Renew. Energy*. 2019. Vol. 141. P. 1103–1116. DOI: 10.1016/j.renene.2019.03.118.
29. Qadr H. An Exploration into Wind Turbines, Their Impacts and Potential Solutions. *Journal of Environmental Science and Public Health*. 2018. Vol. 2, Issue 1. P. 64–69. DOI: 10.26502/jesph.96120029.
30. Falani S., Gonzalez M., Barreto F., Toledo J., Torkomian A. Trends in the technological development of wind energy generation. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*. 2020. Vol. 19. P. 43–68. DOI: 10.1386/tmsd_00015_1.
-

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних 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, кандидат технічних 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.

Хоружевський Григорій Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 000-23-34. E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Харін Руслан Олександрович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: kharinruslan07@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andrievych, 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 Anatolievych, 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.

Khoruzhevskiy Hryhorii Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Kharin Ruslan Olexandrovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: kharinruslan07@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-0747-209X.

Статтю прийнято 19.09.2022 р.

UDC 62-272

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SPRINGS OF COMBINED SPRING SETS

PhD (Tech.) Yevhenii Romanovych, PhD (Tech.) Oleksii Lobiak, PhD (Tech.) Andrii Kravets, PhD (Tech.) Andrii Yevtushenko, PhD (Tech.) Yevhenii Povorozhenko, PhD (Tech.) Anna Kravets

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРУЖИН ПРУЖИННИХ КОМПЛЕКТІВ КОМБІНОВАНОГО ТИПУ

Кандидати техн. наук Є. В. Романович, О. В. Лобяк, А. М. Кравець, А. В. Євтушенко, Є. В. Повороженко, А. Л. Кравець

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267776>



Abstract. *Devices that may be affected by vibration loads from rolling stock passing nearby include automation, signalling and blocking system equipment. Therefore, the currently applicable regulatory document requires testing of this equipment, including vibration testing. Therefore, parameters of vibration protection systems of this equipment should be evaluated at the design stage. Spring sets of vibration protection systems often contain compression springs located in different directions. Accordingly, some of the springs of the spring set work along their longitudinal axis, while some springs work across the longitudinal axis, which makes it possible to call such sets combined spring sets. The literature provides dependences for determining the stiffness of compression springs that are exposed to vibration both along and across their longitudinal axis. However, determining the stiffness of combined spring sets is rather difficult. Therefore, in this paper, we consider a method for determining the required stiffness of combined spring sets and also propose a method for determining the parameters of springs of combined spring sets during designing vibration protection systems for equipment located near railway tracks.*

Keywords: *spring, movement, acceleration, stiffness, vibration protection.*

Анотація. *Залізничний транспорт є джерелом вібраційних впливів, що передаються через ґрунт на розташовані поблизу конструкції та споруди. Ця вібрація може впливати на технічний стан цих споруд. До пристроїв, на працездатність яких може впливати вібраційне навантаження від рухомого складу, що проходить поруч, належить обладнання систем автоматики, сигналізації та блокування. Чинними нормативними документами передбачені випробування цього обладнання, у тому числі на вібраційні навантаження. Але випробування натурних зразків є тривалим і дорогим процесом, тому виникає необхідність ще на стадії проектування оцінити параметри систем вібраційного захисту цього обладнання.*

Для зменшення впливу вібрації на електронні та електротехнічні компоненти в пристроях залізничної автоматики, сигналізації та блокування передбачаються системи вібраційного захисту, в основі яких є пружинні комплекти. Такі комплекти часто містять пружини стиснення, розташовані в різних напрямках. Відповідно частина пружин пружинного комплекту працює вздовж своєї поздовжньої осі, а частина - поперек, що дозволяє називати такі пружинні комплекти комбінованими. У літературі наводяться залежності для визначення жорсткості пружин стиснення, які сприймають вібраційні навантаження як вздовж, так і поперек своєї поздовжньої осі. Але під час визначення жорсткості пружинних комплектів комбінованого типу виникають певні труднощі.

Тому в цій роботі розглянутий спосіб визначення потрібної жорсткості пружинних комплектів комбінованого типу, а також запропонований метод визначення параметрів пружин комбінованих пружинних комплектів на стадії проектування систем вібраційного захисту обладнання, розташованого поблизу залізничних колій.

Сутність запропонованого методу полягає в такому. Шафа керування розглядається як одномасова коливальна система, граничні амплітудно-частотні характеристики якої задані чинними нормативними документами. Це дозволяє визначити необхідну жорсткість пружинного комплекту системи вібраційного захисту. Далі, використовуючи відомі залежності, стає можливим визначення характеристик пружин, з яких складається пружинний комплект. Але при використанні цих залежностей на стадії проектування виникає забагато невідомих показників. У цій роботі наводяться рекомендації щодо обґрунтованого призначення значень цих показників.

Результати досліджень, наведених у цій роботі, були використані на стадії проектування апаратури мікропроцесорної автоматичної системи переїзної сигналізації «ШАПС-М» виробництва ТОВ «АТ СИГНАЛ» (Україна) для визначення показників системи вібраційного захисту цієї апаратури.

Ключові слова: пружини стиснення, вібраційний захист залізничного обладнання, комбіновані пружинні комплекти, жорсткість пружин.

Introduction. Railway transport is a source of vibration effects transmitted through the ground to nearby structures and constructions. This vibration can affect the technical condition of these structures. The main source of vibration during the movement of railway rolling stock is wheel impacts at the joints and irregularities of the rails [1].

Structures located near railway tracks that may be affected by vibration loads from rolling stock passing nearby include automation, signalling and blocking system equipment. Automation, signalling and blocking equipment, which is installed in the Ukrainian

railway transport, must meet the requirements of the standard of Ukrzaliznytsya Joint-Stock Company [2], which defines, among others, requirements for the levels of vibration loads that this equipment must withstand, as well as monitoring methods for such loads.

For example, the controlling equipment of an automatic level crossing signaling system is placed in a metal cabinet (Figure 1). This cabinet is installed at a distance of no more than 5 m from the railway track. Thus, vibrations from the passing rolling stock are transmitted through the ground to this cabinet.

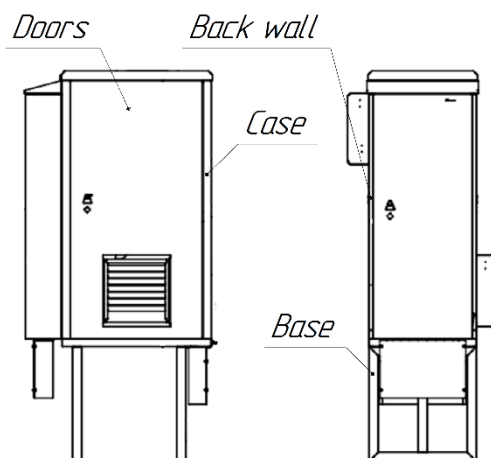


Fig. 1. Control cabinet of the automatic level crossing signaling equipment

To reduce the impact of vibration on the electronic and electrical components of the control system, this equipment is installed on a spring-loaded frame (Figure 2). The spring set of the cabinet frame most often includes cylindrical springs, some of which are located with their axes directed along the Z-axis, and some with their axes directed along the X-axis (Figure 2). Thus, under the action of vibration load along the X-axis, Springs 2 take up this load with their transverse stiffness, while Springs 3 take it up with their longitudinal

stiffness; under the action of vibration load along the Z-axis, Springs 2 take up this load with their longitudinal stiffness, while Springs 3 take the load with their transverse stiffness; under the action of vibration load along the Y-axis, Springs 2 and 3 take up this load with their transverse stiffness. Such a spring set can be called a combined: in such a set, one part of the springs takes up the vibration load with its longitudinal axis, while the other - with its transverse axis.

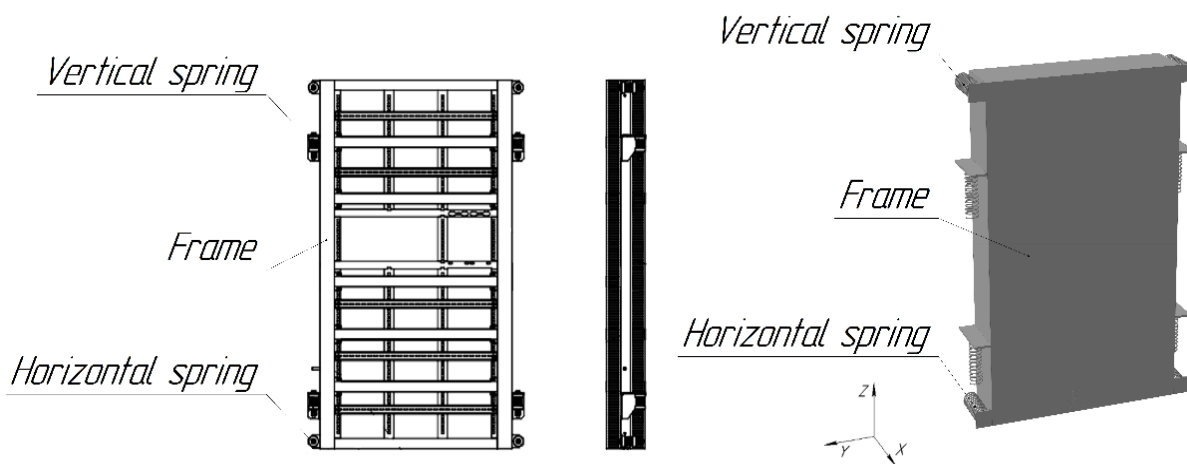


Fig. 2. Spring-loaded frame for installation of control equipment of the automatic level crossing signaling system

The purpose and objectives of the study. The purpose of this article is to develop a new approach to the calculation of spring protection systems for equipment subject to vibration.

To realize this goal, it is necessary to develop a new method of determining the required stiffness of spring sets of the combined type. In practice, check the effectiveness and accuracy of this method for determining the spring parameters of spring sets for vibration protection of railway equipment.

The main part of research. The currently applicable regulatory document [2] sets the maximum values of vibration loads to which railway automation products must be

exposed during acceptance tests. Table 1 shows an example of the test vibration loads required by [2] for the housing of the control cabinet of the automatic level crossing signaling system and the maximum permissible vibration values that can be transmitted to the frame of this cabinet with the equipment installed on it.

I.e., if the constraining forces frequency is less than the transition frequency ($f \leq f_t$), then the controlled parameter is the amplitude of vibrational displacements, and if the frequency of the constraining force is greater than the transition frequency ($f \geq f_t$), then the controlled parameter is the amplitude of vibration accelerations.

Table 1

Vibration test loads of the control cabinet housing and maximum permissible vibration values that can be transmitted to the frame of this cabinet

Constraining force frequency interval f , Hz	Vibration test loads of the control cabinet housing		Maximum permissible vibration values that can be transmitted to the control cabinet frame	
	displacement amplitude A_0 , mm	acceleration amplitude A_0'' , m/s^2	displacement amplitude A , mm	acceleration amplitude A'' , m/s^2
from 5 to 20	1.5	-	0.5	-
from 20 to 80	-	6.0	-	2.3

Note: transition frequency $f_t = 20$ Hz

Simulation of forced vibrations of the cabinet frame

When vibration effects on the cabinet frame with equipment installed on it is simulated, the provisions of the theory of mechanical vibrations given in [3-7] are used. According to this theory, a design scheme was created (Figure 3) and the following assumptions were made:

- the cabinet frame with the equipment installed on it was assumed as an absolutely rigid body, the mass of which is concentrated in its geometric center;
- constraining force applied in the center of mass of the cabinet frame;
- the springs of the spring kit are weightless and inertia free;
- the spring kit is friction-free, environmental resistance is absent.

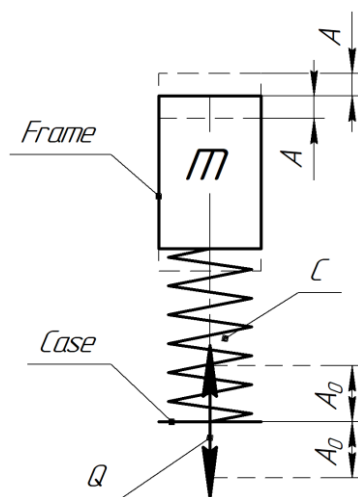


Fig 3. Design scheme of vibration effect on the cabinet frame

In accordance with the requirements of [2], constraining force Q changes along the sine curve. In this case, the differential equation of forced harmonic vibrations of the cabinet frame with the automatic level crossing signaling

equipment installed on it along the X, Y and Z axes (Figure 2) has the following form

$$m \cdot x'' + c_0 \cdot x = H \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (1)$$

According to [3-7], the solution of differential equation (1) will have the form

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (2)$$

Since acceleration is the second derivative of displacement, the formula for determining the acceleration of the cabinet frame with the equipment installed on it will take the following form

$$x'' = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t). \quad (3)$$

In accordance with [3-7], we determine the amplitudes:

• of displacement of the cabinet frame with the equipment installed on it

$$A = \frac{H}{c - \omega^2 \cdot m}; \quad (4)$$

• acceleration of the cabinet frame with equipment installed on it

$$A'' = -\frac{\omega^2 \cdot H}{c - \omega^2 \cdot m}. \quad (5)$$

To find the amplitude of the constraining force, Hooke's law can be used [8, 9]

$$F = -c \cdot \Delta x. \quad (6)$$

According to [2], for the case where the frequency of the compressive force is less than the transition frequency ($f \leq f_t$), the amplitude of forced vibrations of the control cabinet housing is known A_0 . Then the amplitude of the constraining force is determined by the formula

$$H = -c \cdot A_0. \quad (7)$$

Also, in accordance with [3-7], the circular frequency of the constraining force is determined by the formula

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (8)$$

Let us substitute formulas (7) and (8) into formula (4) to finally obtain a formula for

determining the amplitude of displacements of the cabinet frame with the equipment installed on it

$$A = \frac{-c \cdot A_0}{c - 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m}. \quad (9)$$

According to [2], for the case where the frequency of the compressive force is greater than the transition frequency ($f \geq f_t$), the amplitude of accelerations of forced vibrations of the control cabinet housing is known A_0'' . Then the amplitude of the constraining force is determined by the formula

$$H = \frac{c \cdot A_0''}{\omega^2}. \quad (10)$$

We substitute formulas (8) and (10) into formula (5) to finally obtain a formula for determining the acceleration amplitude of the cabinet frame with the equipment installed on it

$$A'' = \frac{-c \cdot A_0''}{c - 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m}. \quad (11)$$

Calculation of the required stiffness of the spring set

Since the values of the amplitudes of vibration displacements and accelerations of the body and frame of the control cabinet are set [2], then the value of the required stiffness of the spring set can be determined using formulas (9) and (11)

$$c = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot A}{A_0 + A}, \quad (12)$$

$$c = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m \cdot A''}{A_0'' + A''}. \quad (13)$$

Taking into account the requirements of the current regulatory document [2], the required stiffness of the spring set should be determined in two frequency ranges of the coercive force:

Frequency range 1. From the minimum frequency of the coercive force f_{min} to the

transition frequency f_t – according to the formula (12);

Frequency range 2. From the transition frequency f_t to the maximum f_{max} – according to the formula (13).

Since the requirements of the applicable regulatory document [2] on vibration protection are the same for all directions of vibration, determining the required stiffness of the spring

set for each of the axes (Figure 2) of forced oscillations is not necessary.

For example, Table 2 shows the results of calculations of the required stiffness of the spring set of the control cabinet of the automatic crossing alarm system at minimum m_{min} and maximum m_{max} weights of the frame with the installed equipment. The rest of the source data are taken from Table 1.

Table 2

The results of calculations of the required stiffness of the spring set of the control cabinet of the automatic crossing alarm system

Weight of the frame with the installed instruments m , kg	Required stiffness of the spring set c , kN/m			
	Frequency range 1		Frequency range 2	
	$f_{min} = 5$ Hz	$f_t = 20$ Hz	$f_t = 20$ Hz	$f_{max} = 80$
$m_{min} = 76$ kg	18.8	300.0	332.6	5321.1
$m_{max} = 118$ kg	29.1	465.8	516.4	8261.7

The least of the received values should be accepted as the calculated value, in our case the required stiffness of a spring set was розрахункового значення $c = 18.8$ kN.

Determining stiffness of springs of the combined spring set.

In general, the stiffness of a combined spring set along the corresponding axis of application of the vibration load (Figure 2) can be defined as the total stiffness of springs operating in the longitudinal and transverse directions

$$c = \sum c_l + \sum c_t. \tag{14}$$

In view of technological and economic considerations, developers of vibration protection systems often try to ensure that all springs of the spring set are the same. Let us consider this variant, in which all the springs of the spring set are the same. For example, when the compressive force is directed along the Z-axis (Figure 2), the stiffness of a combined spring set can be determined as follows

$$c = c_l \cdot n_l + c_t \cdot n_t. \tag{15}$$

The longitudinal stiffness of a spring is determined by the formula given in [10, 11]

$$c_l = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n \cdot \psi}. \tag{16}$$

According to [10], the coefficient depends on the spring index

$$\psi = \begin{cases} 1 - \frac{3}{16 \cdot i^2} & \text{at } i \leq 5, \\ 1 & \text{at } i > 5 \end{cases}, \tag{17}$$

where i - spring index.

According to [10], the spring index is defined as the ratio of the average spring diameter to the diameter of the bar from which the spring is made

$$i = \frac{D}{d}. \tag{18}$$

According to [10], the transverse stiffness of a spring is determined by the formula

$$c_t = \frac{3 \cdot E \cdot d^4}{8 \cdot D \cdot n \cdot [h_0^2 \cdot (2 + \mu) + 3 \cdot D^2]} \quad (19)$$

Let us substitute formulas (16) and (19) into formula (15). In this case, the formula for determining the stiffness of the combined spring set will take the following form, N/m

$$c = \frac{G \cdot n_l \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n \cdot \psi} + \frac{3 \cdot E \cdot n_t \cdot d^4}{8 \cdot D \cdot n \cdot [h_0^2 \cdot (2 + \mu) + 3 \cdot D^2]} \quad (20)$$

Formula (20) requires the stiffness of the spring set c is known, it can be defined from formulas (12) and (13). The diameter of wire from which the spring is made d , average spring diameter D , spring height in the free state h_0 , number of active coils of the spring n , as well as the coefficient ψ , which depends on the spring index i are unknown. In preliminary calculations of the parameters of springs of the spring set, the coefficient that depends on the spring index can be ignored by assigning $\psi = 1$ [12]. This allows us to somewhat simplify formula (20) by limiting the number of unknown quantities to four: d , D , n and h_0

$$c = \frac{G \cdot n_l \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n} + \frac{3 \cdot E \cdot n_t \cdot d^4}{8 \cdot D \cdot n \cdot [h_0^2 \cdot (2 + \mu) + 3 \cdot D^2]} \quad (21)$$

Hence, it is convenient to express the diameter of wire from which the spring is made

$$d = \sqrt[4]{\frac{8 \cdot n \cdot c}{\frac{G \cdot n_l}{D^3} + \frac{3 \cdot E \cdot n_t}{D \cdot [h_0^2 \cdot (2 + \mu) + 3 \cdot D^2]}}} \quad (22)$$

In this formula the average spring diameter D , spring height in the free state h_0 , number of active coils of the spring n are unknown.

Also, when designing device elements, it can be useful to estimate the height of the springs of the spring set

$$h_0 = \sqrt{\frac{3 \cdot D^2}{2 + \mu} \cdot \left(\frac{E \cdot n_t \cdot n \cdot d^4}{8 \cdot c \cdot n \cdot D^3 - G \cdot n_l \cdot d^4} \right)} \quad (23)$$

The source data in the calculations using formulas (22) and (23) are three values. For example, in formula (23) such values are the diameter of the wire from which the spring is made d , the mean diameter of the spring D , and the number of active coils of the spring N . Such amount of source data complicates the selection of this data. Then the minimum number of active coils of the spring N_{min} can be determined.

To simplify the selection of source data, let us consider formula (23). According to the rules of algebra [13] in formula (23), the expression under the sign of the square root cannot have a negative value. In this case, the expression $(8 \cdot c \cdot N \cdot D^3 - G \cdot n_l \cdot d^4)$ must be at least zero

$$N_{min} \geq \frac{G \cdot n_l \cdot d^4}{8 \cdot c \cdot D^3} \quad (24)$$

To perform the calculation according to this formula, the diameter of the wire from which the spring is made d and the mean diameter of the spring D should be chosen. The outer diameter of the spring D_a is most commonly used to design a spring set. Then the mean diameter of the spring D

$$D = D_a - d \quad (25)$$

In such case, formula (24) will have the form

$$N_{min} \geq \frac{G \cdot n_l \cdot d^4}{8 \cdot c \cdot (D_a - d)^3} \quad (26)$$

The obtained number of active coils of the spring N_{min} should be rounded up to the nearest whole number.

Procedure for predetermination of parameters of the springs

Based on the above, we can recommend the following step-by-step procedure for pre-

determining the parameters of the springs of the spring set.

Step 1. After analyzing vibration loads on the device and selecting the design of the spring set, stiffness of the spring set is determined according to formulas (12) and (13). The lowest value among those calculated by these formulas should be chosen as the required stiffness of the spring set.

Step 2. For the sake of the design, the values of the diameter of the wire from which the spring is made d , and the outer diameter of the spring D_a should be pre-determined. It should be borne in mind that an increase in the diameter d of the wire from which the spring is made results in an increase in the stiffness of the spring, while an increase of the outer diameter of the spring results in a decrease in the stiffness of the spring.

Step 3. According to formula (26), the minimum number of active coils of the spring N_{min} should be calculated and the number of active coils of the spring N should be determined based on the condition $N \geq N_{min}$.

Step 4. According to formula (23), the height of the springs of the spring set is determined. To reduce the height of the spring, the number of active coils of the spring N should be increased. It should be borne in mind that too many active coils can lead to collisions of the coils under load, which is unacceptable.

Step 5. According to the relevant methods, which are not described herein, the strength and durability of the springs are determined.

Step 6. The final parameters of springs of the set are determined.

Conclusions. The proposed method reduces the duration and simplifies the complexity of the process of determining the parameters of the springs of combined spring sets. It is also easy to implement as software.

This method was tested to determine the parameters of individual springs of spring sets for vibration protection of the control equipment of the crossing alarm system and showed high efficiency and sufficient accuracy.

List of symbols:

X, Y, Z	axes along which forced oscillations occur
f	frequency of coercive force [Hz]
f_t	transition frequency [Hz]
A_0	amplitude of test displacements of the control cabinet body [m]
A_0''	amplitude of test accelerations of the control cabinet body [m/s ²]
A	maximum permissible amplitude of test displacements of the control cabinet frame with the installed crossing signaling equipment [m]
A''	maximum permissible amplitude of test accelerations of the control cabinet frame with the installed crossing signaling equipment [m/s ²]
m	mass of the control cabinet frame with the installed crossing signaling equipment [kg]
c	stiffness of the spring set [N/m]
Q	coercive force [N]
x''	acceleration of the frame of the cabinet with the installed on-board signaling equipment [m/s ²]
x	displacement of the cabinet frame with the installed crossing signaling equipment [m]
H	amplitude of the coercive force [N]
ω	circular frequency of the coercive force [radian/s]
t	time [s]
F	force [H]
Δx	spring elongation [m]
f_{min}	minimum test frequency of the coercive force [Hz]
f_{max}	maximum test frequency of the coercive force [Hz]
m_{min}	minimum mass of the frame with the installed crossing signaling equipment [kg]
m_{max}	maximum mass of the frame with the installed crossing signaling equipment [kg]
$\sum c_l$	total stiffness of springs that take vibration load along its longitudinal axis [N/m]
$\sum c_t$	total stiffness of springs that take vibration load across their longitudinal axis [N/m]

c_l	longitudinal spring stiffness [N/m]	ψ	coefficient depending on the spring index
n_l	number of springs that receive vibration load along their axis [pcs]	i	spring index
c_t	transverse spring stiffness [N/m]	E	modulus of normal elasticity of spring material [Pa]
n_t	number of springs that take vibration load across their axis [pcs]	h_0	spring height in free state [m]
G	shear modulus (modulus of rigidity) of spring material [Pa]	μ	ratio of transverse strain of the spring material (Poisson's ratio)
d	spring wire diameter [m]	N_{min}	minimum number of active coils of the spring [pcs.]
D	mean spring diameter [m]	D_a	outer diameter of the spring [m].
N	number of active coils of the spring [pcs]		

References

1. Bobin E. V. Bor'ba s proizvodstvennym shumom i vibraciej na zheleznodorozhnom transporte. Publishing house «Transport», Moscow, 1967. 302 p.
2. SOU 45.020-00034045-002:2006. Railway automation, telemechanics and communications products. General technical conditions. Official edition. The State Administration of Railroad Transport of Ukraine «Ukrzaliznytsya», Kyiv, 2007. 187 p.
3. Timoshenko S., Young D. H., Weaver W. Jr. Vibration problems in engineering. John Willey & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1991. 472 p.
4. S. Graham Kelly. Mechanical Vibrations. Theory and Applications. Cengage Learning, 2011. 878 p.
5. Baev V. C. Theory of vibrations. Second edition. Publishing house «Urayt», Moscow, 2018. 348 p.
6. Vulfson I. I. A short course in the theory of mechanical oscillations. Library of the journal «Bulletin of Scientific and Technical Development», Moscow, 2017. 241 p.
7. Panovko Ya. G. Vvedenie v teoriyu mehanicheskikh kolebaniy. Third edition. Publishing house «Nauka», Moscow, 1991. 256 p.
8. Novozhilov V. V. Theory of elasticity. Publishing house «Polytechnic», St. Petersburg, 2012. 409 p.
9. Landau L. D., Lifshic E. M. Theory of elasticity. Fourth edition. Publishing house «Nauka», Moscow, 1987. 248 p.
10. GOST 34628-2019 Springs and spring assemblages of spring suspension of railway rolling stock. Methods of strength analysis at longitudinal and combined loading. Official edition. Publishing house «Standartinform», Moscow, 2020. 22 p.
11. Norms for the calculation and design of new and modernized railway cars of the Ministry of Railways of the 1520 mm gauge (non-self-propelled): Approved by the Ministry of Heavy and Transport Engineering of the USSR and the Ministry of Railways of the USSR. VNIIV-VNIIZhT, Moscow, 1983. 310 p.
12. Dunaev P. F., Lelikov O. P. Designing units and parts of machines. Thirteenth edition. Bauman Moscow State Technical University Publishing House, Moscow, 2017. 564 p.
13. Khoroshilova E. V. Elementary mathematics. Part 1: Number theory. Algebra. Moscow University Press, Moscow, 2010. 472 p.

Романович Євгеній Валентинович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net . ORCID iD: 0000-0003-2555-5849.

Лобяк Олексій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 805-90-93. E-mail: lobiak@ukr.net . ORCID iD: 0000-0002-9553-4245.

Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 503-98-23. E-mail: kravets_am@ukr.net . ORCID iD: 0000-0002-3251-6576.

Євтушенко Андрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (067) 385-62-94. E-mail: ave65@ukr.net . ORCID iD: 0000-0002-8575-3030.

Повороженко Євгеній Віталійович, кандидат технічних наук, ревізор з безпеки руху АТ «Укрзалізниця». Тел.: +38 (050) 302-57-02. E-mail: uto1993@ukr.net . ORCID iD 0000-0002-8310-618X.

Кравець Анна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 210-04-23. E-mail: anya.obukhova@gmail.com . ORCID iD: 0000-0003-1165-1960.

Romanovych Yevhenii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (067) 427-47-70. E-mail: 0674274770@ukr.net . ORCID iD: 0000-0003-2555-5849.

Lobiak Oleksii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Building Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 805-90-93. E-mail: lobiak@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245.

Kravets Andrii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (050) 503-98-23. E-mail: kravets_am@ukr.net . ORCID iD: 0000-0002-3251-6576.

Yevtushenko Andrii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (067) 385-62-94. E-mail: ave65@ukr.net. ORCID iD: 0000-0002-8575-3030.

Povorozhenko Yevhenii, PhD (Tech.), Traffic safety auditor of JSC Ukrzaliznytsia. Tel.: +38 (050) 302-57-02. E-mail: uto1993@ukr.net. ORCID iD 0000-0002-8310-618X.

Kravets Anna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (098) 210-04-23. E-mail: anya.obukhova@gmail.com . ORCID iD: 0000-0003-1165-1960.

Статтю прийнято 28.09.2022 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.012.45

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬ ЖИТЛОВОГО ФОНДУ МІСТА ХАРКОВА ЩОДО ЇХНЬОЇ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ

Канд. техн. наук П. А. Резнік, аспіранти М. Альмохамад, В. В. Тенесеску

ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF THE EXISTING BUILDINGS OF THE HOUSING FUND OF THE KHARKIV CITY ON THE SUBJECT OF THEIR PERFORMANCE AS A CONSEQUENCE OF THE INFLUENCE OF COMBAT ACTIONS

PhD (Tech.) P. Reznik, postgraduate students M. Almohamad, V. Tenesesku

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267755>



***Анотація.** У статті наведено огляд основних конструктивних рішень існуючих житлових будівель м. Харкова та проаналізована їхня працездатність з точки зору стійкості до вибухових впливів і, як наслідок, прогресуючого обвалення. Зазначається, що з кожним роком зацікавленість світової наукової спільноти в питаннях прогресуючого обвалення зростає, оскільки, на превеликий жаль, збільшується кількість випадків лавиноподібного обвалення споруд різних типів. Разом з тим відмічається, що вітчизняні норми поки що не конкретизують методіку розрахунку будівель до прогресуючого обвалення, а наявні методи експериментального та чисельного аналізу все ще потребують доопрацювання. На базі виконаного аналізу конструктивних рішень житлової забудови м. Харкова виокремлено тип будівель, який, на думку авторів статті, має найбільший ресурс, і надано стислі рекомендації щодо його підвищення в майбутньому.*

***Ключові слова:** працездатність, прогресуюче обвалення, відповідальний елемент, конструктивні рішення, укриття.*

***Abstract.** The article examines the main structural solutions of existing residential buildings in the city of Kharkiv and analyzes their working capacity from the point of view of resistance to explosive effects and, as a result, progressive collapse. It is known that progressive collapse is characteristic of extreme (emergency) cases, when due to destruction of a responsible element of the structure as a result of a gas explosion, ammunition bursts, climatic cataclysms, transport collapses, etc a part of the building or the entire structure collapses. It is noted that every year, the interest of the world scientific community in the issues of progressive collapse is growing, because, unfortunately, the number of cases of avalanche-like collapse of buildings of various types is increasing. This was facilitated by already known cases of collapses of various objects, such as the Ronan Point residential building (Great Britain) in 1968 or the buildings of the World Trade Center (USA) in 2011, or the very recent case of the collapse of a residential building in Surfside (USA) in 2021. At the same time, it is noted that domestic regulations do not yet specify the methodology for calculating buildings before progressive collapse, and the existing methods of experimental and numerical analysis still need to be refined. Unfortunately, the list of such objects is increasing, and today, Ukraine has added to it numerous destroyed buildings as a result of ongoing hostilities on its territory. Therefore, for our country in the current conditions, the issue of ensuring the future stability*

of all buildings, and in particular, the housing stock against progressive collapse, is an urgent issue. On the basis of the analysis of the constructive solutions of the housing development in the city of Kharkiv, the type of buildings that, according to the authors of the article, has the greatest resource, is singled out, and brief recommendations are given for its increase in the future.

Keywords: *working capacity, progressive collapse, the responsible element, constructive solutions, shelter.*

Вступ. Екстремальні умови навантаження внаслідок бойових дій, такі як удар чи вибух, що можуть призводити до значних руйнувань або повного обвалення будинку, зазвичай не враховуються в поточній практиці проєктування та аналізу конструкцій. На сьогодні в українському нормативному полі наявні декілька документів, що регламентують необхідність врахування прогресуючого обвалення споруд, – це ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні споруди» [1] і ДБН В.1.2-14:2018 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» [2], однак, яким саме має бути алгоритм розрахунку споруди і чим керуватись проєктувальникам, поки що невідомо. Заплановані до випуску 2022 р. ДСТУ з розрахунку на прогресуюче обвалення та оцінювання залишкового ресурсу об'єктів будівництва поки що, враховуючи останні події, залишаються на стадії «проєкту». Однак вже сьогодні стає зрозумілим, що для сфери українського будівництва обов'язковим має стати врахування стійкості до прогресуючого обвалення не лише для будівель підвищеної поверховості, але й для звичайних житлових і громадських будівель по всій країні.

Коли конструкції зазнають таких динамічних впливів, можуть бути завдані значні пошкодження конструктивним елементам. За найгіршим сценарієм, несучі елементи можуть бути повністю зруйновані, що може призвести до обвалення частини або всієї конструкції, великої кількості жертв і значних економічних втрат. В останні десятиліття ми стали свідками великої уваги спільноти інженерів-будівельників до питань запобігання лавиноподібному руйнуванню конструкцій

[3-5]. Термін «прогресуюче руйнування» на сьогодні відомий як поширення початкового локального руйнування від одного або кількох елементів до сусідніх, що зрештою призводить до руйнування всієї конструкції або непропорційно великої її частини [6]. З моменту першого зафіксованого випадку прогресуючого обвалення 1968 р. відбулося багато трагічних обвалень будівель різного призначення та з різних причин, що змусило спеціалістів будівельної галузі звернути особливу увагу на це питання. Зокрема навіть ті, хто не причетний до будівництва, можуть пам'ятати трагічні події 2001 р. в США, коли були зруйновані будівлі Всесвітнього торговельного центру в м. Нью-Йорк (рис. 1, а) внаслідок теракту, або обвалення житлової будівлі в м. Серфсайд у 2021 р. (рис. 1, б) і багато інших. Тому розуміння механізму руйнування конструкцій і точний аналіз мають вирішальне значення для проєктування нових і модернізації існуючих конструкцій і контролю руйнування.

Сьогодні трагічний досвід руйнування багатоповерхових будівель, пізнали мешканці багатьох міст України (рис. 2).

За даними голови Харківської ОВА, станом на 14 липня 2022 р. по Харківській області внаслідок бойових дій зруйновані або мають пошкодження 4232 житлових будинки, з них понад 2700 – це багатоповерхівки та багатопід'їзні багатоквартирні будинки, а також більше 500 навчальних закладів, 100 медичних установ, 97 закладів культури, 12 промислових підприємств. Внаслідок бомбардувань та обстрілів агресором зруйновано і пошкоджено більше 4800 об'єктів інфраструктури. На жаль, чим довше триває війна, тим більшою стає

цифра зруйнованих будівель. Тому питання оцінювання працездатності будівель харківської забудови та їхньої стійкості до

прогресуючого обвалення зараз стало особливо актуальним.



а



б

Рис. 1. Приклади будівель, що зазнали прогресуючого обвалення: а – Всесвітній торговельний центр (Нью-Йорк, США); б – житловий будинок (Серфсайд, США)



а



б

Рис. 2. Приклади обвалення будівель в Україні внаслідок бойових дій: а – м. Бородянка (Київська обл.), б – м. Харків

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити щорічне збільшення кількості публікацій [7], присвячених аналізу прогресуючого обвалення залізобетонних каркасних конструкцій (рис. 3), що відображує

зростаючий інтерес науковців до цієї проблеми. Перш за все він пояснюється зростанням очікувань користувачів в отриманні інформації про конструктивний захист об'єктів будівництва від екстремальних інцидентів.

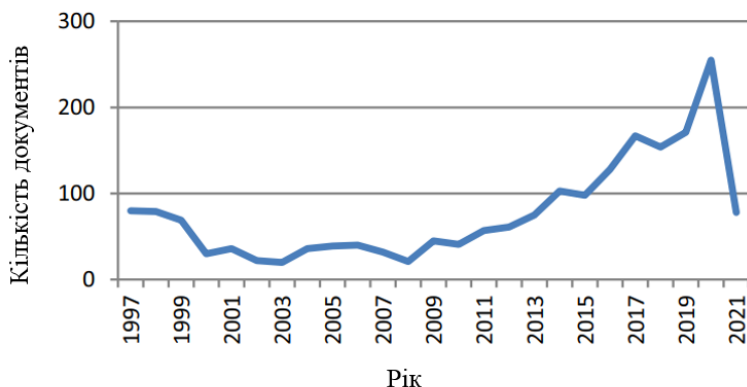


Рис. 3. Кількість статей, публікованих авторами щорічно в журналі Scopus (ELSEVIER) з питань аналізу прогресивного обвалення каркасних залізобетонних конструкцій (до 31 січня 2021 р.) [7]

Для вивчення стійкості конструкцій до прогресуючого обвалення дослідниками зазвичай застосовуються експериментальні та чисельні методи. Лабораторні дослідження в основному зосереджені на плоских рамних конструкціях [8, 9], вузлах сполучення балок з колонами [10, 11], а також масштабованих просторових залізобетонних конструкціях [12, 13]. Наприклад, американським дослідником М. Сасані було проведено низку польових випробувань для вивчення стійкості до прогресуючого обвалення за різних сценаріїв видалення колон у 2007-2011 рр. [14, 15]. За результатами випробувань, основними механізмами опору руйнуванню залізобетонних конструкцій є робота на вигин, розпір і створення додаткових ступенів передачі навантаження. З одного боку, випробування плоских рамних конструкцій або окремих вузлів сполучень не здатні репрезентувати поведінку конструктиву в цілому через його значно більшу складність. З іншого боку, результати випробування на масштабованих конструкціях часто ставляться під сумнів у зв'язку з тим, що власне закони масштабування не завжди точно витримуються. Разом з тим експериментальні натурні дослідження стійкості повномасштабних конструкцій до прогресуючого обвалення неминуче стикаються з багатьма пробле-

мами, зокрема такими, як висока вартість і надмірна складність, що перешкоджає можливості проведення дублюючих розрахунків або параметричних досліджень.

З розвитком комп'ютерних технологій та обчислювальної механіки стало можливим тестування повномасштабних конструкцій у математичній формі. Розроблено програмне забезпечення, в основу якого закладена низка чисельних методів аналізу, що може бути використано для встановлення стійкості до прогресуючого обвалення залізобетонних конструкцій, включаючи метод дискретних елементів (DEM), метод прикладних елементів (AEM) і метод скінченних елементів (FEM). Однак використання перелічених методів з детальними моделями все ще займає багато машинного часу для завершення повного розрахунку обвалення конструкції, що робить їх непридатними для варіантного аналізу або оцінювання конструктивної надійності після обвалення. Наприклад, Weidlinger Associates Inc. (WAI) у 2011 р. провела серію розрахунків на прогресуюче обвалення [16] з використанням детальних скінченно-елементних моделей для двох п'ятиповерхових будинків із залізобетонним каркасом за різними сценаріями руйнування колон, що зайняло забагато часу, навіть враховуючи залучені додаткові потужності.

Як наслідок, для аналізу на прогресуюче обвалення були широко застосовані спрощені скінченно-елементні моделі залізобетонних конструкцій з використанням рамних елементів через їхню обчислювальну ефективність. На жаль, структурна модель, що була використана в таких симуляціях, не враховує руйнування вузлів, руйнування внаслідок втрати зчеплення між арматурою і бетоном при великих деформаціях та ін. В останні роки Національний інститут стандартів і технологій (NIST) провів багато дослідницьких робіт, щоб врахувати та усунути ці особливості. Однак розглянуті в основному були сталеві конструкції [17]. Успіхи використання спрощених обчислювальних моделей для залізобетонних конструктивів є дуже обмеженими. Бао [18] запропонував використання укрупнених моделей для оцінювання прогресуючого обвалення каркасних залізобетонних конструкцій, яку пізніше було модифіковано відповідно до результатів тестувань на повномасштабних вузлах залізобетонних конструкцій [19]. Разом з тим на сьогодні все ще бракує тривимірних спрощених чисельних моделей [20], які можна було б надійно та ефективно використовувати для оцінювання поступового обвалення каркасних конструкцій.

Визначення мети та завдання дослідження. Враховуючи наведену вище інформацію стаття має на меті систематизацію конструктивних рішень будівель житлового фонду м. Харкова з позиції їхньої працездатності, а також стійкості до прогресуючого обвалення та надзвичайних впливів під час бойових дій. Мета передбачає вирішення таких завдань:

- аналіз конструктивних рішень існуючої забудови м. Харкова та систематизацію будинків за відповідними категоріями;
- виявлення в конструкціях перерахованих будинків елементів, що є найбільш схильними до ураження внаслідок динамічних впливів і, як наслідок, прогресуючого обвалення;

- надання стислих рекомендацій щодо захисту знов споруджуваних будівель з найбільш працездатною конструктивною схемою, враховуючи досвід наявних руйнувань від аварійних впливів і прогресуючого обвалення.

Основна частина дослідження. Більшість існуючих будівель житлового фонду м. Харкова умовно можна віднести, у певному сенсі, до чотирьох часових періодів:

- будинки XIX – початку XX ст. («старі місто»);
- будинки 30-х рр. XX ст. (епоха конструктивізму);
- будинки, зведені після закінчення Другої світової війни;
- сучасні будинки незалежної України.

Значна частина будівель Харкова, що збереглися і експлуатуються зараз, належать до часів «старого міста» та були збудовані наприкінці XIX – початку XX ст. Ці будівлі з цегляним остовом мають тільки вертикальні несучі стіни або стіни і цегляні або залізобетонні колони всередині. Перекриття здебільшого виконані дерев'яними. Велика кількість таких будівель зосереджена в центральній частині міста (рис. 4).

На початку XX ст. у Харкові зводяться також знакові для міста будівлі у стилі конструктивізм. Для багатьох з них впроваджується технологія індустріального залізобетону. До цих будинків належить Держпром (будинок державної промисловості) – один з перших радянських монолітних залізобетонних багатоповерхових будинків, пам'ятка архітектури у стилі конструктивізму (рис. 5). Будівля зводилася протягом 1925-1928 рр. за проєктом архітекторів С. Серафімова, С. Кравця і М. Фельгера. Під керівництвом головного інженера будівництва П. Роттерта розроблена технологія індустріального залізобетону. Крім Держпрому, знаковими для міста також є будинок головного поштамту і колишній готель «Інтернаціонал» (нині «Харків») (рис. 6).



Рис. 4. Житлові будинки часів «старого міста»: а – пров. Плетнівський, 7; б – вул. Гоголя, 11



Рис. 5. Перша монолітна будівля Харкова – будинок Держпрому



Рис. 6. Готель «Інтернаціонал» (а) і головний поштамт (б)

Після закінчення Другої світової війни у Харкові розпочинається активне будівництво. У цей період зводиться більшість існуючих до цього дня «сталінок» – узагальнена розмовна назва багатоквартирних цегляних будинків, побудованих у період з 1933 по 1961 рр. по

всій території колишнього СРСР (рис. 7). Також у цей період місто почало забудовуватися за типовими проєктами житлового будівництва. Так, до 1955 р. квартали Харкова забудовувалися переважно малоповерховими будинками за київською серією 1-406.



а



б

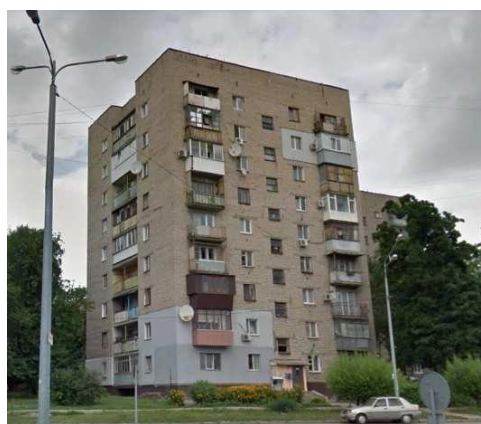
Рис. 7. Будинки, що іменуються «сталінками»: а – вул. Університетська, 9; б – вул. Мироносицька, 17

У 1955 р. в СРСР виходить постанова «Про усунення надмірностей у проектуванні та будівництві». Результатом цієї постанови стало радикальне зменшення житлової та загальної площі квартир, пов'язане з початком масовогопосімейного заселення, а також зникнення з фасадів будинків різних прикрас. Такі будинки стали називатися «хрущовками». «Хрущовки» – типові панельні або цегляні житлові будинки,

зазвичай п'ятиповерхові, з малогабаритними квартирами. Багато вулиць Харкова забудовано п'ятиповерхівками серій 1-438, 1-447С, 1-464, 1-468 і їхніх варіацій (рис. 8, а). У середині 1960-х рр. з'явилися перші типові дев'ятиповерхові будинки Харкова, що належали до серій 1-447С та 1у-438А, які в ідеологічному плані також можна віднести до «хрущовок» (рис. 8, б).



а



б

Рис. 8. Харківські «хрущовки»: а – житловий будинок по вул. Єсеніна 3, серія 1-438-5; б – вул. Світла 2, серія 1-447С

Після прийняття на початку 1970-х рр. «Єдиного каталогу будівельних деталей», на основі якого розроблялися всі подальші нові типові проєкти, Харківський ДБК № 1 розпочав виробництво панелей московської серії П-57 ЮА (рис. 9, а) і розроблених у «Харківпроекті» будинків серій 1-468А-55,

59. Будинками цих двох типових серій забудовано багато районів міста, вони є одними з найпоширеніших типових будівель. Паралельно з цим, починаючи з середини 1970-х рр., «Житлобуд-1» розпочинає будівництво дув'ятиповерхових цегляних будинків за серією 87 (рис. 9, б).



а



б

Рис. 9. Житлові будинки серії:

а – П-57 ЮА по вул. Балакірева, 20; б – серія 87 по Салтівському шосе, 248, а

На початку 1980-х рр. ДБК № 1 переходить із застарілих серій П-57 ЮА та 1-468А-55, 59 на більш сучасні серії: дев'ятиповерхову серію 163 (рис. 10, а) та шістнадцятиповерхову 162 (рис. 10, б), які отримали Державну премію УРСР у галузі архітектури. Компанія «Житлобуд-1» буде чотирнадцятиповерхові будинки за типовим проєктом серії 87 – 124-87-107.

Після розпаду СРСР ДБК № 1, який планував перейти до нової серії панельних будинків 176, перестає існувати, як і здебільшого все типовежитлове будівництво в Харкові. За винятком Курязького ДБК, який до кінця 2000-х продовжував зводити будинки серії 182 у м. Пісочині і м. Харкові. Багато будівель «Житлобуд-1», побудовані в цей період, також були поліпшеною версією цегляної серії 87.



а



б

Рис. 10. Крупнопанельні житлові будинки:

а – 163 серії (вул. Матюшенко, 3, а); б – 162 серії (вул. Танкопія, 7)

Сучасні житлові будинки та офісні будівлі почали зводити за індивідуальними проектами, що являють собою цегляні будівлі заввишки до 16 поверхів або монолітні залізобетонні каркасні будівлі висотою до 25 поверхів (рис. 11, а). Якщо на початку багато цегляних будинків являли собою перероблену версію серії 87, то з

часом застосування знайшли багатопустотні плити прогоном 12.0 м, а з розвитком у Харкові виробництва попередньо-напружених залізобетонних конструкцій безопалубного формування, архітектура таких будівель стала значно відрізнятися від типових серійних проектів (рис. 11, б).



а



б

Рис. 11. Сучасні монолітні будинки (а – ЖК «Фаворит») і цегляні (б – ЖК по просп. Героїв Харкова, 64, а)

За своїм конструктивним рішенням, серед охарактеризованої житлової забудови м. Харкова можна виділити три групи найпоширеніших типів житлових будівель (рис. 12).

Аналіз пошкоджень будівель та рекомендації щодо можливого відновлення та будівництва нових будівель. Післявоєнному відновленню та зведенню нових будівель мають передувати всебічне обстеження пошкоджень, вивчення досвіду інших країн і внесення змін до існуючих нормативних документів. У кожному окремому випадку рішення про доцільність відновлення або його неможливість має прийматися окремо залежно від завданих збитків і/або складності робіт. Звісно, усі історичні будівлі мають бути реабілітовані, оскільки вони формують унікальний вигляд нашого міста.

Що стосується досвіду з відновлення будинків після вибухових впливів, у Харкові у 2012 р. було отримано позитивний досвід відновлення будівлі після вибуху природного газу в шістнадцятиповерховому панельному будинку за адресою просп. Героїв Харкова, 248, г (рис. 13). Тоді було розроблено робочий проект капітального ремонту будівлі, який передбачав заміну зруйнованих конструкцій із збереженням об'ємно-планувальних рішень відповідно до типового проекту серії 162. Будівельні роботи мали забезпечити відновлення ресурсу жорсткості та міцності будівлі. У рамках цих робіт було передбачено часткову заміну стінових панелей на каркасні полегшені конструкції, заміну зруйнованих збірних панелей перекриття на нові монолітні плити (9-11 поверхи), а також посилення існуючих панелей перекриття і внутрішніх несучих стінових панелей.

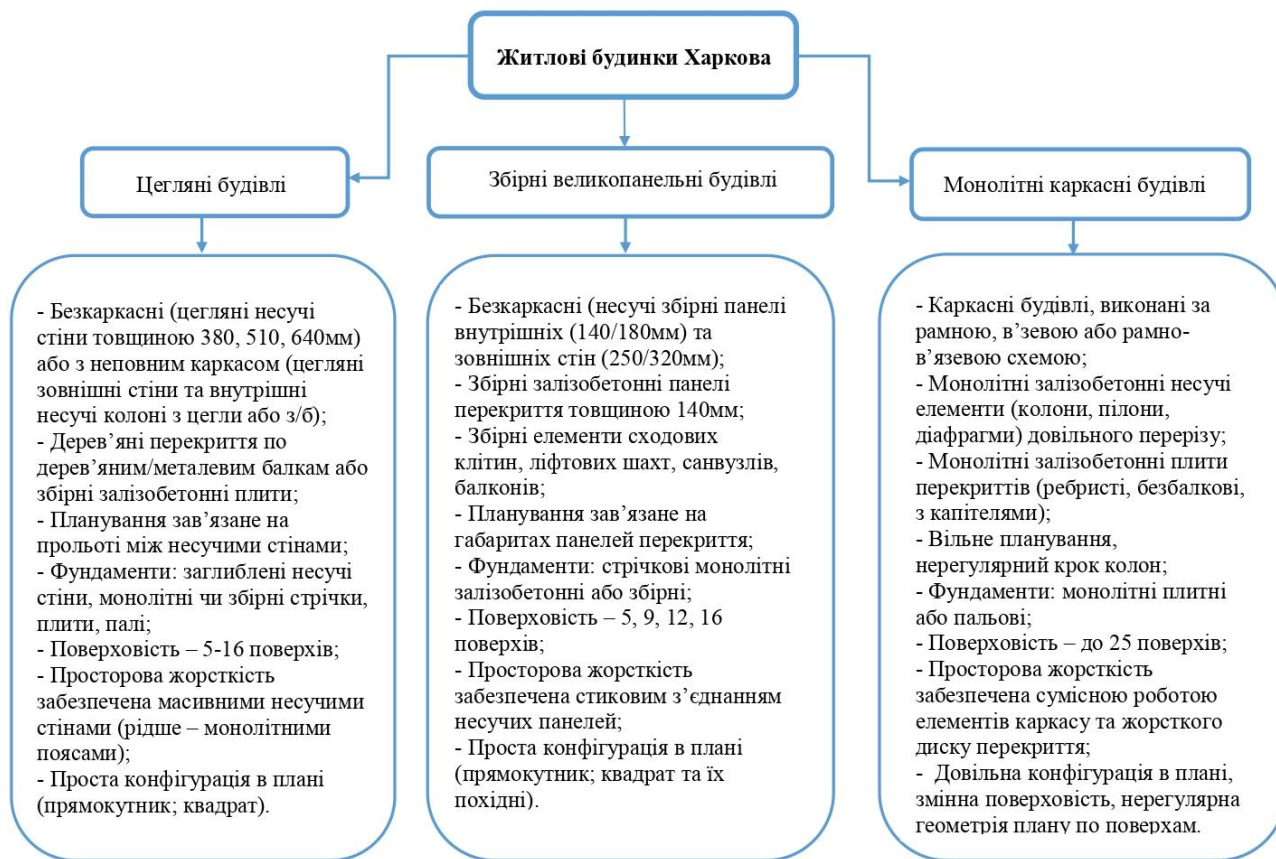


Рис. 12. Основні конструктивні рішення житлової забудови м. Харкова



Рис. 13. Наслідки вибуху природного газу в шістнадцятиповерховому панельному будинку (а) і загальний вигляд відновленого фасаду (б)

Однак у реаліях, що склалися, коли сотні панельних будівель зазнали руйнувань і з ладу виведено велику кількість несучих панелей, з урахуванням відсутності на сьогодні підприємств, які випускають ці

панелі, відновлення таких будівель є досить складним завданням. Ця обставина вимагає розроблення нових прогресивних рішень без або з урахуванням повного демонтажу споруди.

У поточних умовах бойових дій поки що неможливо провести всебічний аналіз із виявленням усіх пошкоджень і руйнувань. Навіть після закінчення війни процес встановлення конкретних пошкоджень і прийняття рішення про знесення чи відновлення будівель займе час. Жодна житлова будівля в Харкові, яка зазнала обстрілів, не розрахована на можливість опору таким засобам ураження. На Харків скидалися бомби вагою 500 кг і крилаті ракети з бойовою частиною в межах 400 кг.

Далеко не кожна фортифікаційна споруда здатна витримати такі масовані та тривалі обстріли, не кажучи вже про житлові будинки. Зокрема й існуючі європейські рекомендації щодо розрахунку несучих конструкцій на вибухові впливи «Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components» [20] розглядають як основний тип впливу – зовнішній вибух, а не прямий обстріл чи бомбардування житлових будівель (рис. 14).

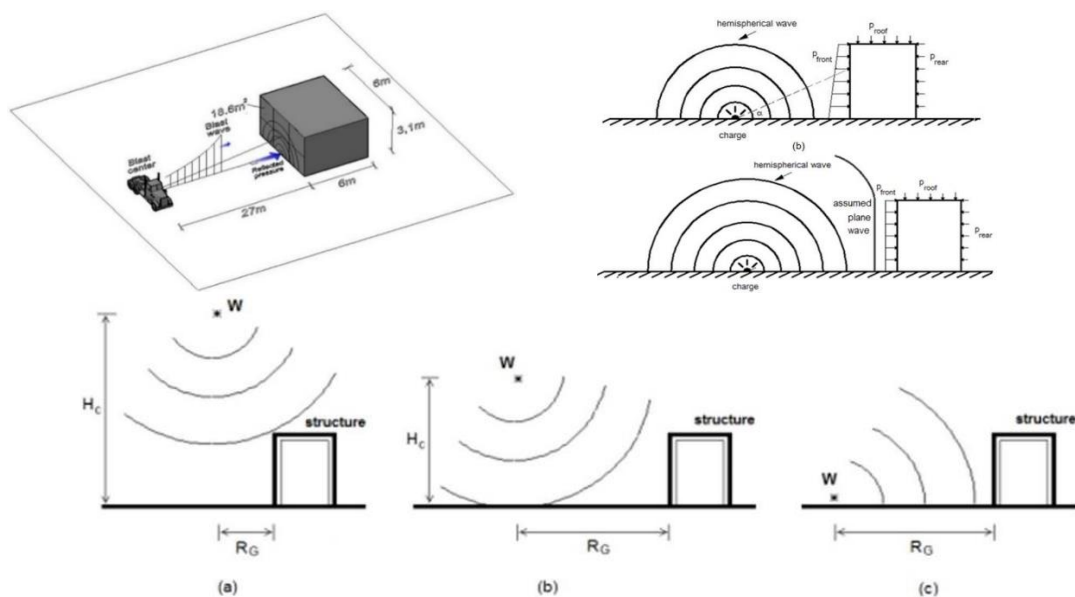


Рис. 14. Різні сценарії навантаження від зовнішніх вибухів

Не можна виділити якийсь один тип будівель з перерахованих вище і стверджувати, що він був схильний до руйнувань менше або більше. Наприклад, старі цегляні будинки («сталінки») мають значну, за сучасними мірками, товщину стін (не менше 640 мм), однак при цьому перекриття в них переважно дерев'яні. Такі перекриття не утворюють єдиного жорсткого диску, здатного перерозподіляти навантаження і не можуть чинити опір від проникного впливу зосереджених навантажень при вибухах. Крім того, такі перекриття є горючими, що також зменшує працездатність будівель у разі влучання

об'єктів ураження, наприклад через покрівлю та подальшу пожежу всередині.

Більш сучасні цегляні будинки з перекриттями з пустотних попередньо-напружених залізобетонних плит часто об'єднані в єдині диски. Просторова жорсткість у всіх типів цегляних будівель є значною, що забезпечується за рахунок великої кількості вертикальних несучих стін. Тим не менш, при локальному пошкодженні опорної зони плити можливе обвалення однієї або кількох плит перекриттів. Крім того, товщина зовнішніх стін у таких будинках може зменшуватися до 380 мм, що є недостатнім при прямому

влучанні засобів ураження. На сьогодні відомі випадки руйнування стін товщиною 510 мм від безпосереднього влучання снаряду.

Ще більшу просторову жорсткість мають панельні будівлі, де, окрім зовнішніх, усі внутрішні панелі також є несучими. Конструктивним місцем панельних будівель, що мають найбільшу схильність до руйнування при різних впливах, є вузли сполучення панелей. При недостатній жорсткості стиків можливе обвалення значної частини або всієї будівлі. Саме такий вид руйнування конструкцій у будівельній науці і отримав назву прогресуючого обвалення.

Разом з тим, на відміну від інших типів розглянутих будівель, можна відзначити, що монолітні каркасні будинки, імовірно, здатні забезпечити більшу стійкість, у тому числі і до прогресуючого обвалення, ніж решта перелічених споруд. Зокрема через наявність більш надійного з'єднання вертикальних елементів каркасу з горизонтальними дисками перекриттів значно більший ступінь статичної невизначеності та більшу просторову жорсткість порівняно з іншими типами будівель. Якщо ж говорити, власне, про вплив від вибухової хвилі, то люди в цих спорудах все ж таки не до кінця перебувають у повній безпеці, адже стіни таких будівель є ненесучими та часто виконані з дрібнорозмірних блоків малої щільності або взагалі мають велику площу скління, що є приводом для використання надійних укриттів – надземних чи підземних.

При проектуванні будинків в Україні вимога забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення є обов'язковою тільки для будівель класу наслідків (відповідальності) ССЗ, за ДБН В.1.2-14:2018 [2]. Будинки, запроектовані відповідно до цих вимог, при раптовому видаленні одного або декількох вертикальних несучих елементів, мають зберегти цілісність або щонайменше не допустити обвалення конструкцій понад встановлену їхню кількість. Проте нормативні документи з докладними

методиками та вимогами ще не до кінця введені в дію в нашій країні. Запропоновані методики піддаються критиці. Наприклад, при потрапленні снаряду варто враховувати не тільки вихід з ладу якогось одного вертикального елемента конструкції, але й додаткові дії вибухової хвилі та можливість виникнення пожежі.

Якщо говорити про забезпечення стійкості багатоповерхових будівель із залізобетонним каркасом до прогресуючого обвалення, слід вживати такі конструктивні заходи [22]:

- забезпечити безперерізність перекриттів і безперервність армування конструкцій як у плані, так і по висоті;
- підсилювати (за необхідності) сусідні вертикальні несучі конструкції, які можуть сприймати навантаження від елемента, що зазнав руйнування;
- застосовувати подвійне безперервне армування верхньої та нижньої зон перекриттів. При цьому загальна площа арматури в обох напрямках має бути не менше 0,25 % площі перерізу бетону;
- надійно стикувати та анкерувати арматуру у відповідальних вузлах – на стиках з'єднання стін, колон і перекриттів.

Розрахунок будівель слід виконувати за просторовою трисидною схемою «основа – фундамент – споруда», використовуючи при цьому сучасні програмні комплекси, що враховують фізичну та геометричну нелінійності, а також забезпечують високу точність результатів розрахунків і можливість економії матеріалів.

Виконувати розрахунок доцільно за такою схемою:

- спочатку виконується розрахунок будівлі на постійні й тимчасові навантаження, включені до аварійного сполучення, у фізично нелінійній постановці;
- напружено-деформований стан, отриманий на попередньому етапі, зазначається стартовим для подальшого розрахунку на дію навантажень від тих елементів, що були вилучені в результаті руйнування;

- проводиться розрахунок на додаткове навантаження від вилучених елементів у фізично та геометрично нелінійних постановках. Навантаження, що виникає від вилучення зруйнованих елементів, має відповідати зусиллям, що були отримані в цих елементах на попередньому етапі розрахунку з урахуванням збільшення на коефіцієнт динамічності 1,2. Далі виконується перевірка елементів, що залишилися, за несучою здатністю без урахування поздовжнього вигину.

Додатково слід зазначити, що на сьогодні ефективним та апробованим [23] методом аналізу конструкцій на прогресуюче обвалення є енергетичний метод з побудовою енергетичного портрета. Алгоритм цього методу можна подати як такі процедури:

- побудова полів граничної щільності енергії деформації в елементах конструктиву з урахуванням фізичної та/або геометричної нелінійностей [24];

- відбір елементів з максимальними значеннями граничної щільності на основі аналізу отриманих полів на попередньому кроці;

- призначення обраних елементів як «відповідальних» [22];

- проведення розрахунків за локальними розрахунковими схемами з урахуванням усунення з них «відповідальних» елементів;

- міцнісний аналіз отриманих результатів (розрахунок за групою I граничних станів); збільшенням перерізів арматури та класу бетону (за необхідності).

Що ж стосується конструктивних заходів гарантування безпеки людей у монолітних будинках, то слід звернути увагу на досвід Ізраїлю, де у всіх сучасних будівлях, за їхнім законодавством, обов'язкове будівництво захищених кімнат Мерхав Муган (букв. захищений простір), відомий як маммад. Мерхав Муган вважається альтернативою бомбосховищу, адже в умовах обмеженості часу до них можна швидше дістатися, аніж до спеціального бомбосховища, що може бути розташоване на деякій відстані. Маммад забезпечує захист від різних типів снарядів і хімічної зброї.

Конструкція маммадів може бути різною (рис. 15, а). Але, як правило, це приміщення обмежене монолітними залізобетонними стінами товщиною не менше 300 мм і вікном, захищеним сталевим листом завтовшки 30-50 мм, яке автоматично зачиняється за сигналом тривоги. Маммади обладнані незалежною системою вентиляції, фільтрації повітря та системами оповіщення. На жаль, навіть такі потужні споруди не замінюють бомбосховищам (рис. 15, б), але в нових реаліях будівництво таких приміщень у будинках може стати постійною практикою.



а



б

Рис. 15. Будівництво маммаду в Ізраїлі (а) і його натурне випробування (б)

Висновки. Житловий фонд м. Харкова дуже різноманітний і включає будівлі різних років будівництва, де застосовувалися різні конструктивні схеми, матеріали та рішення. Зокрема виділено, що за часом зведення житлові будинки можна розділити на чотири групи, а за конструктивним рішеннями – на три: цегляні, збірні великопанельні та монолітні залізобетонні. Аналізуючи руйнування будівель м. Харкова і їхній конструктив, слід зазначити, що в цегляних будівлях періоду «старого міста» найбільш ненадійними є плити перекриттів, виконані переважно дерев'яними, у сучасних цегляних будинках – це несучі стіни недостатньої товщини та зона обпирання збірних плит перекриттів на зовнішні стіни, у панельних будинках – вузли стикування несучих панелей. Крім того, можна зробити висновок, що монолітні залізобетонні будівлі найбільше здатні до супротиву впливам подібного роду, гарантуючи в більшості випадків цілісність несучого остову, але не огорожувальних конструкцій. Окрім

обов'язкового розрахунку на прогресуюче обвалення монолітних залізобетонних будинків, зокрема з використанням наведених вище алгоритмів на базі енергетичного методу, при проєкуванні слід звертати особливу увагу на відповідальні вузли сполучення несучих елементів, враховувати дію ударної хвилі, передбачати надійне підземне укриття, обладнане сучасними інженерними системами, або спеціальні захищені кімнати в межах кожного житлового поверху (за типом маммадів), здатні вберегти життя якнайбільшої кількості людей.

Після перемоги України над російськими окупантами на Харків та інші міста України чекає велика робота з відновлення та модернізації міст. При розробленні проєктів відбудови наголошено на створенні та доступності бомбосховищ, укріплених паркінгів і сучасних укриттів для закладів соціальної сфери, які дозволять гарантувати людям безпеку при повітряній тривозі, та інші рекомендації, перелічені вище.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Чинний від 01.01.2020. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/v_2_2_41/1-1-0-1855 (дата звернення: 31.07.2022).
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Чинний від 01.01.2019. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_1_2_14/1-1-0-1826 (дата звернення: 31.07.2022).
3. Alashker Y., Li H., El-Tawil S. Approximations in progressive collapse modeling. *Journal of Structural Engineering*. 137(9). 2011. P. 914–924. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000452) (last access: 31.07.2022).
4. El-Tawil S., Li H., Kunnath S. Computational simulation of gravity-induced progressive collapse of steel-frame buildings: current trends and future research needs. *Journal of Structural Engineering*. 140(8). 2013. A2513001112. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000897](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000897) (last access: 31.07.2022).
5. Iribarren B. S., Berke P., Bouillard P., et al. Investigation of the influence of design and material parameters in the progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Structures*. 33(10). 2011. P. 2805–2820. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.06.005> (last access: 31.07.2022).
6. Ellingwood B. R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 20(4). 2006. P. 315–323. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2006\)20:4\(315\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(315)) (last access: 31.07.2022).

7. Pawan Kumar, Samrat Lavendra and T. Raghavendra. A Review on the Progressive Collapse Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 822. 2021. 012003. DOI:10.1088/1755-1315/822/1/012003 (last access: 31.07.2022).
8. Orton S. L., Kirby J. E. Dynamic response of a RC frame under column removal. Journal of Performance of Constructed Facilities. 28(4). 2013. 04014010. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000464) (last access: 31.07.2022).
9. Stinger S. M., Orton S. L. Experimental evaluation of disproportionate collapse resistance in reinforced concrete frames. ACI Structural Journal. 110(3). 2013. P. 521-529. DOI:10.14359/51685609 (last access: 31.07.2022).
10. Yu J., Tan K. H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. Engineering Structures. 55. 2013. P. 90–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.040> (last access: 31.07.2022).
11. Qian K., Li B. Performance of three-dimensional reinforced concrete beam-column substructures under loss of a corner column scenario. Journal of Structural Engineering. 139(4). 2012. P. 584–594. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000630](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630) (last access: 31.07.2022).
12. Kokot S., Anthoine A., Negro P., et al. Static and dynamic analysis of a reinforced concrete flat slab frame building for progressive collapse. Engineering Structures. 40. 2012. P. 205–217. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.026> (last access: 31.07.2022).
13. Xiao Y., Kunnath S., Li F. W., et al. Collapse test of three-story half-scale reinforced concrete frame building. ACI Structural Journal. 112(4). 2015. P. 429–438. DOI:10.14359/51687746 (last access: 31.07.2022).
14. Sasani M., Kazemi A., Sagioglu S., et al. Progressive collapse resistance of an actual 11-story structure subjected to severe initial damage. Journal of Structural Engineering. 137(9). 2011. P. 893–902. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000418 (last access: 31.07.2022).
15. Sasani M., Bazan M., Sagioglu S. Experimental and analytical progressive collapse evaluation of actual reinforced concrete structure. ACI Structural Journal. 104(6). 2007. P. 731–739.
16. Department of Homeland Security. Preventing Structures from Collapsing. Washington, DC. 2011. Department of Homeland Security. 196 p.
17. Main J. A., Sadek F. Modeling and analysis of single-plate shear connections under column loss. Journal of Structural Engineering. 140(3). 2013. 04013070. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000866) (last access: 31.07.2022).
18. Bao Y., Kunnath S.K., El-Tawil S., et al. Macromodel-based simulation of progressive collapse. RC frame structures. Journal of Structural Engineering 134(7). 2008. P. 1079–1091. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:7\(1070\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1070)) (last access: 31.07.2022).
19. Lew H.S., Bao Y., Sadek F., et al. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. 10.6028/NIST.TN.1720. 2011. 106 p. DOI:10.6028/NIST.TN.1720 (last access: 31.07.2022).
20. Zhong-Xian Li, Bo Zhong, Yanchao Shi, Yang Ding, Yifei Hao. A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures. International Journal of Protective Structures. Vol. 10, Is. 3. 2019. P. 330-358. URL: <https://doi.org/10.1177/2041419619854768> (last access: 31.07.2022).
21. Karlos V., Viaccoz B., Solomos G. Calculation of blast loads for application to structural components. Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen. 2013. 58 p. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.111039 (last access: 31.07.2022).
22. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:20009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) /

В. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова та ін.; за заг. ред. В. С. Шмуклера. Харків: Золоті сторінки, 2015. 208 с.

23. Шмуклер В. С., Резнік П. А., Альмохамад М. Про одну можливість оцінювання прогресуючого обвалення. Конструкцій при пожежі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 194. С. 37-48. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217291> (дата звернення: 31.07.2022).

24. Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Бурак Н. П. Каркасные системы облегченного типа. Харьков: Золотые страницы, 2008. 336 с.

Резнік Петро Аркадійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Мохамад Альмохамад, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Тенесеску Владислав Віталійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-4935-4454. E-mail: mrtenesesku@gmail.com.

Petro Reznik, PhD (Tech.), Associate Professor, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-3937-6833. E-mail: engipr@gmail.com.

Mohamd Almohamad, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-3715-7437. E-mail: engipr@gmail.com.

Vladyslav Tenesesku, postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-4935-4454. E-mail: mrtenesesku@gmail.com.

Статтю прийнято 16.08.2022 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 528.117

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ТОЧОК УМОВНОЇ РЕПЕРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ КРИВИХ ДІЛЯНОК ЗАЛІЗНИЦЬ

Д-р екон. наук К. А. Мамонов, кандидати техн. наук О. С. Саяпін, Є. Ф. Орел,
С. М. Камчатна, О. М. Пустовойтова

PLACEMENT OPTIMIZATION OF THE POINTS OF THE CONDITIONAL REPER NETWORK FOR RAILWAY CURVES

D. Sc. (Econ.) K. Mamonov, PhD (Tech.) O. Saiapin, PhD (Tech.) Y. Orel,
PhD (Tech.) S. Kamchatna, PhD (Tech.) O. Pustovoitova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267757>



Анотація. Контроль геодезичних параметрів дуже важливий для безпеки руху на залізниці. Такий контроль необхідно проводити регулярно через відхилення осі колії внаслідок руху поїздів. Метою статті є розроблення математичного обґрунтування розміщення залізничних реперів для створення «власної» умовної реперної мережі залізниці. Ці постійні репери є основними точками як для етапу будівництва, так і етапу експлуатації. Описано метод і отримано координати кривої від будь-якої точки умовної реперної мережі залізниці.

Ключові слова: геодезична реперна мережа, залізнична крива, координати, точність.

Abstract. Railway facilities are responsible and complex structures related to the safety of passenger traffic and cargo transportation. To ensure the reliability of all systems, the railway track needs continual control of its geometric parameters. Railways require high accuracy of survey and monitoring both at the construction stage and at the operation stage. Such control can be carried out using control points of the geodetic benchmark network. These control points must be located near the railway track to provide it in the design position and in proper working condition. That is why the development of "own" railways benchmark network is topical.

The purpose of this article is to create a mathematical basis for calculating the locations of own repers near the railway. These benchmarks will be control points that will be used by track-operation stations, track machine stations, engineering and geodetic departments, track-surveying stations, services and departments, as well as project and construction organizations during research, design, operation, repair, reconstruction, or new construction. This will keep the track in good condition and be used for leveling the track during repair work. The paper considers the calculation method for the placement of control points of the conditional benchmark network on the curved section of the railway. The novelty is the usage of the mean-value theorem of integral calculus to calculate the coordinates of the curve independently of the national geodetic network. The creation of "own" conditional benchmark network allows railways to perform the pegging of lines and curves regardless of the presence or remoteness of control points of the local or state geodetic network. After choosing a conditional benchmark, the coordinates of the railway curve, which is divided into 5 parts, were calculated. It is shown that the number of points does not affect the accuracy of determining the coordinates. Thus, fewer rappers can be dispensed, and the speed of the pegging will increase. The polar coordinates for the two polar distances from the conventional benchmark have been

determined. It is established that the use of the mean-value theorem of the integral calculus to find the coordinates of a point gives more accurate data, since this method does not involve replacing the arc with a chord. The described method of determining polar coordinates from any point of one's own network of conditional benchmarks is of practical importance. After deviating the axis of the track from the movement of trains, maintenance workers can put it back without additional calculation.

Keywords: *geodetic benchmark network, railway curve, coordinates, accuracy.*

Вступ. Залізничні об'єкти є відповідальними і складними спорудами, пов'язаними з безпекою руху пасажирів і перевезення вантажів. Для забезпечення надійності всіх систем залізнична колія потребує постійного контролю її геометричних параметрів. Залізниці вимагають високої точності вишукувань і моніторингу як на етапі будівництва, так і етапі експлуатації. Такий контроль можна здійснювати з використанням опорних пунктів геодезичної реперної мережі. Ці контрольні пункти мають бути розташовані поблизу залізничної колії для забезпечення утримання її у проєктному положенні та належного робочого стану. Для цього контролю можна використовувати національну геодезичну мережу або локальну геодезичну мережу. Однак колійні працівники можуть зіткнутися з деякими труднощами. По-перше, пункти державної або місцевої геодезичної мережі іноді розміщено далеко від залізничної колії. Між геодезичними реперами та залізницею можуть перебувати природні або штучні об'єкти, наприклад дерева, пагорби, споруди тощо. Це ускладнює видимість і погіршує якість зйомки місця розташування. По-друге, частина орієнтирів може бути знищена. Наприклад, дослідження [1, 2] показують, що близько 50 % точок було знищено, пошкоджено, не перевірено або не знайдено. Крім того, розвиток глобальної супутникової навігаційної системи дав можливість створювати геодезичні мережі з високою точністю, що забезпечує можливість проведення геодезичних вимірювань з міліметровою точністю. Але точність локальних мереж відповідає часу їх

створення. Необхідна точність порівняно з національною геодезичною мережею в деяких випадках не може бути дотримана [2]. У результаті виникають проблеми з узгодженням даних вимірювань, отриманих з однієї мережі в різний час. Це робить актуальною роботу зі створення власної реперної мережі залізниць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із важливих і мало проаналізованих етапів технічного обслуговування залізниці є визначення стану колії відповідно до рівня, ширини колії та розташування в плані [3]. Це дослідження демонструє розбіжність між даними, отриманими за допомогою колієвимірювальної машини та геодезичного контролю. Як показано [3], дорожньо-геодезична машина, що декларує високу точність, може оцінити лише можливість проходження поїзда, але вона жодним чином не ідентифікує повне просідання колії чи її відхилення. Геодезичні машини можуть проводити зйомку та ефективно виявляти відмінності, якщо відстань між відхиленнями становить щонайменше 18 м. Геодезичне обладнання дозволяє проводити точкову зйомку через кожні 5 м. Дані оцінюються як єдине ціле (прямі, поперечні та криві сегменти). Уточнюється загальний ухил ділянки залізниці. Геодезичні машини не можуть оцінити цей факт. Зміни геометрії кривих мають значний вплив на обмеження швидкості руху поїздів. Під час оцінювання стану колії за даними колієвимірювального вагона може виникнути така ситуація, коли фактичні характеристики ділянки показують, що вона придатна для експлуатації і жоден із показників не

змінився до значення, коли швидкість поїзда має бути зменшена. З іншого боку, якщо порівнювати геометрію колії з початковими проєктними даними, можна помітити розбіжності. У цьому випадку межа розбіжностей може бути значно перевищена. І хоч вагон-колієвимірвач не зафіксував значних відхилень, які призведуть до обмеження швидкості, проте колія не відповідає вихідній геометрії та придатна для використання лише завдяки додатковим резервованим відстаням.

У роботі [4] описано точне позиціонування за допомогою глобальної навігаційної супутникової системи в залізничному будівництві під час будівництва та обслуговування залізничної лінії. Цей метод дозволяє визначити точне положення з межею абсолютної різниці від 10 до 15 мм. Однак іоносферна затримка є найвпливовішим джерелом помилок у позиціонуванні GPS [5]. Щоб підвищити точність вимірюваної оцінки, необхідно вирішити проблему спільної обробки результатів вимірювань функціонально пов'язаних величин [6]. Надлишкові вимірювання можуть підвищити точність оцінок вимірюваних значень, але призводять до неузгодженості результатів вимірювань. Для мінімізації кількості спостережень у мережі досить широко використовується метод параметричного корегування, а також модель витрат [7], модель ідеально створених вимірювань [8] і модель помірної надмірності [9]. Кращим рішенням є завчасне визначення кількості вимірювань, що буде надано в цій статті нижче. Існують декілька видів досліджень щодо моніторингу залізничних об'єктів інфраструктури [10–13]. Такі об'єкти будуються та експлуатуються в умовах обмеженої прямої видимості або утрудненого спостереження. Вони потребують використання кількох інструментів для швидкого й точного визначення положення та орієнтації, наприклад безпілотного літального апарату та двох роботизованих тахеометрів [13]. Це

призводить до ускладнень і подорожчання вишукувальних робіт. Прогресивний метод наземного лазерного сканування ще не широко використовується для залізничних колій, за винятком мостів і тунелів [11]. Крім того, ці автори не сумніваються, що точність вимірювання дальності під час наземного лазерного сканування не така висока, як у традиційних інструментів, таких як нівеліри й тахеометри. Більшість робіт щодо залізничної інфраструктури виконується за допомогою мобільних лазерних сканерів [10]. Однак ці методи стосуються виявлення дефектів, відстані або розмірів. Вони не використовуються для робіт з вирівнювання колії під час ремонтних робіт. Для високошвидкісної залізниці діагностика сумісності опорних точок має бути важливим кроком, яким на практиці часто нехтують [12]. Тому розвиток власної еталонної мережі є вкрай актуальним для залізниці.

Оптимальна кількість спостережень у геодезичній мережі є важливим інженерним питанням при оцінюванні роботи споруди. Автори роботи [14] навели гібридний підхід, який поєднує інформаційну ентропію та еволюційний алгоритм для оптимізації вимірювальної структури геодезичної мережі. Визначено цільову функцію, якою була інформаційна ентропія геодезичної системи спостереження через ентропію вектора параметрів з істинними значеннями. Це дозволяло відбирати лише ті спостереження, що мали найвищу інформативність. Недоліки цього підходу полягають у тому, що процедуру потрібно запускати кілька разів, і ця процедура залежить від різних методів вимірювання, а також від шуму в наборах даних вимірювання. Існує багато складних математичних алгоритмів, які забезпечують точність геодезичних розрахунків, наприклад метод багатокритеріального прийняття рішень [15], вимірювання невизначеності та моделювання за методом Монте-Карло [16], ентропія як логарифмічна міра ймовірності [17]. Тим не

менш найпростішим методом є метод найменших квадратів [18].

Для уникнення вищезазначених випадків у смузі відведення залізниці необхідно встановити так звану «мережу умовних реперів». Подібні геодезичні базові точки використовуються для оцінювання зміщення контрольних точок на дамбі [19] або тунелі [20]. Але на залізниці такий підхід ще не застосовувався. Крім того, для відновлення геометрії колії в початкове положення в деяких випадках неможливо використовувати національну або локальну геодезичну мережу через її віддаленість або незручність розташування.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є створення математичної основи для розрахунку місць розміщення власних реперів біля залізниці. Ці реперні пункти будуть контрольними точками, які використовуватимуться колійно-експлуатаційними дільницями, колійними машинними станціями, інженерно-геодезичними відділами, колійно-знімальними дільницями, службами та відділами, а також проєктними та будівельними організаціями під час проведення вишукувань, проєктування, експлуатації, ремонту, реконструкції або нового будівництва. Це дозволить підтримувати колію в справному стані та використовувати для вирівнювання колії під час ремонтних робіт. У роботі розглянуто розрахунковий метод розташування контрольних точок умовної реперної мережі на кривій ділянці залізниці. Новизна полягає у використанні теореми середнього значення інтегрального числення для обчислення координат кривої незалежно від національної геодезичної мережі.

Основна частина дослідження

Методика вимірювань і розрахунків. Перед будівництвом залізниці потрібно провести геодезичні вишукування, розмістити точки, що лежать на лініях будівництва, встановити необхідні репери, спроектувати осі на основу. Електронний тахеометр є

найефективнішим приладом для такої роботи [21]. Для отримання експериментальних даних координат кривої використовувався тахеометр для візування кругової кривої залізничних колій з прямим визначенням координат на двадцятиметрових відрізках за типовою процедурою, що містить встановлення стійки зі світловідбивачем у кожній точці залізничної колії, вимірювання і запис відстані до цієї точки, а також горизонтального і вертикального кутів до неї. Ці вимірювання є основою для визначення планового та висотного положення цих точок відносно тахеометра. Місця дислокації електронного тахеометра будуть основними точками умовної еталонної мережі. Ці контрольні точки мають залишитися для майбутніх ремонтних робіт. У процесі експлуатації відбувається зміщення осі залізниці. Для повернення колії у вихідне положення ремонтники використовуватимуть дані геодезичного вимірювання з однієї точки, яка називається «полюсом» – базовою точкою умовної геодезичної мережі. Розглянемо, скільки реперів потрібно для виведення залізничної кривої з одного полюса.

Розташування контрольних точок залежить від довжини і кривизни залізничної кривої, а також кількості реперів n . Цю криву можна зобразити за допомогою функції $f(x)$ (рис. 1). Ця функція буде визначена нижче як апроксимація експериментальних даних. Розділимо дугу на рівні частини $l_n = \frac{l}{n}$. Кількість секцій становить $\frac{n}{2}$ або $\frac{n-1}{2}$. Кожна частина l_i ($i = 1, \dots, n$) пов'язана зі значенням абсцис x_i . Точка c є серединою частини l_i . Точку c вибирають так, щоб заштриховані сектори мали однакову площу по обидві сторони кривої (S_l і S_n). Точка c_i відповідає значенню абсциси c .

Для визначення координат точки використовується теорема про середнє значення інтегрального числення

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x)dx = f(c_i)(x_i - x_{i-1}), c_i \in (x_{i-1}; x_i). \quad (1)$$

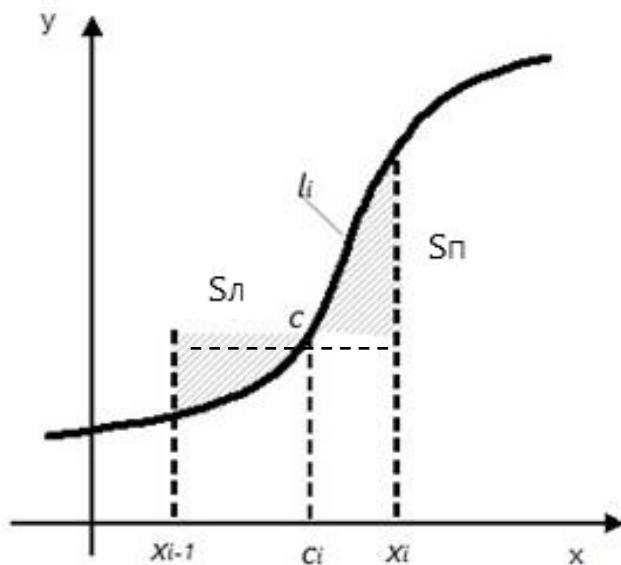


Рис. 1. Інтегрована функція в декартовій системі координат

Для визначення кутів нахилу відрізків інтегральної кривої використовується такий метод. По осі абсцис ліворуч від початку координат виділено «полюс P » (рис. 2). Цей полюс може бути як початком кривої, так і контрольною точкою умовної геодезичної мережі. Відстань OP дорівнює довжині одиниці масштабу, що використовується

для x і y . Продовжуючи горизонтальні лінії до осі y , було отримано ряд точок, позначених цифрами $1, 2, \dots, n$. Якщо полюс P з'єднати з цими точками на осі y , кути променів $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}_n$ будуть рівні $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$. Відрізки інтегральної кривої мають бути паралельні цим променям.

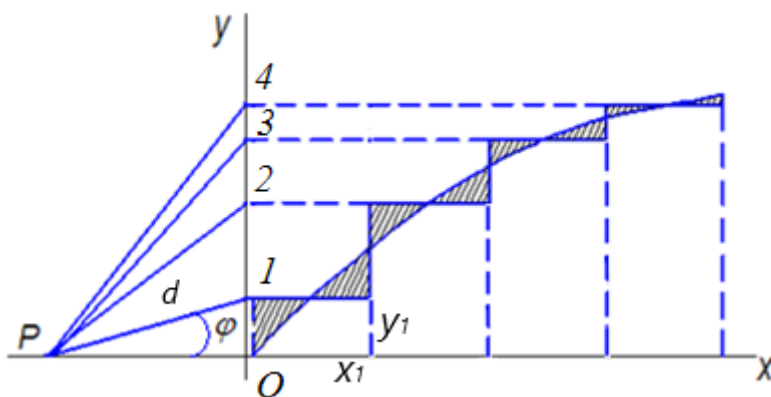


Рис. 2. Інтегральні сегменти кривої

Координати точки перетворюються на класичну геодезичну мережу (відстані p та горизонтальні кути φ) за допомогою рівнянь

$$\varphi = \arctg \frac{y}{x+p}, \quad (2)$$

$$p = \sqrt{(x+p)^2 + y^2}, \quad (3)$$

де p – відстань між полюсом і початком кривої.

Результати і обговорення.

Координати точки вимірювали за допомогою електронного тахеометра для кривої ділянки залізниці. Ця крива

розташована між станцією *M* і станцією *N* Південної залізниці. Дані координат вимірюваних точок кривої наведено в табл. 1 і показано на рис. 3.

Таблиця 1

Дані координат вимірюваних точок кривої

x	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
y	-23	-57,22	-66	-80,27	-109	-146	-149,43	-212,53	-210,32	-256,06	-299,78
x	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	x
y	-329,37	-389,5	-432,62	-433,27	-522,83	-508,08	-565,6	-671,92	-727,15	-762,79	y

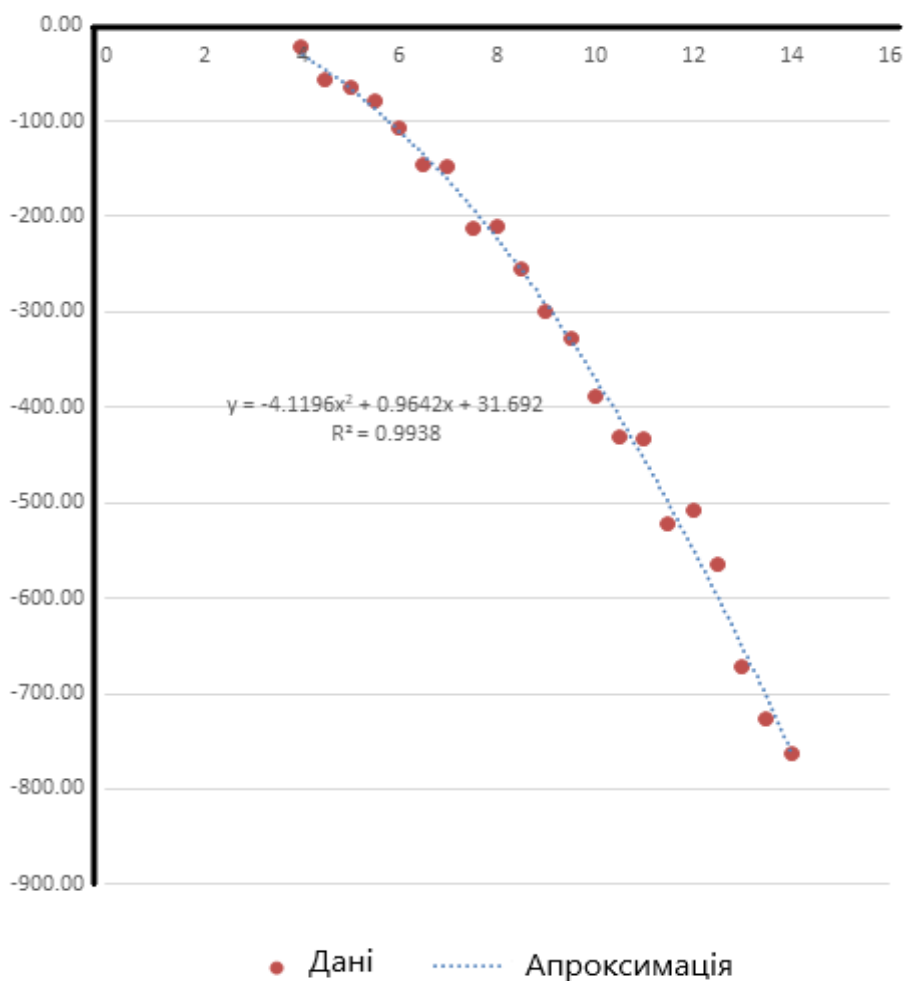


Рис. 3. Лінія регресії

Експериментальні дані апроксимовано функцією $y = -4x^2 + x + 32$ ($R^2 = 0,9938$). Довжина дуги кривої на ділянці (4; 14)

дорівнює $l = 710,08$ м. Щоб встановити 11 реперів, криву розбивають на $\frac{11-1}{2} = 5$ частин однакової довжини

$$l_5 = \frac{710,08}{5} = 142,016 \text{ м.}$$

За допомогою функції

$$y = -4x^2 + x + 32$$

для кожної частини знайдено значення абсцис x_i (табл. 2).

Таблиця 2

Значення абсцис для інтервалів

№	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(4; 7,232)	(7,232; 9,399)	(9,399; 11,148)	(11,148; 12,655)	(12,655; 14)
l_i	142,016	142,016	142,016	142,016	142,016

Використовуючи теорему про середнє значення координати середніх точок c_i ,

були знайдені для кожної частини. Для першого інтервалу

$$\int_4^{7,232} (-4x^2 + x + 32)dx = (7,232 - 4) * (-4c_1^2 + c_1 + 32), c_1 \in (4; 7,232)$$

$$c_1 \approx 5,695.$$

Для другого інтервалу

$$\int_{7,232}^{9,399} (-4x^2 + x + 32)dx = (9,399 - 7,232) * (-4c_2^2 + c_2 + 32), c_2 \in (7,232; 9,399)$$

$$c_2 \approx 8,399.$$

І так далі для всіх п'яти інтервалів.

Після знаходження середніх точок поділу за стандартними формулами обчислюють площі

$$S_L = \int_{x_{i-1}}^{c_i} (f(c_i) - f(x))dx, \quad (4)$$

$$S_{\Pi} = \int_{c_i}^{x_i} (f(x) - f(c_i))dx. \quad (5)$$

У результаті були розраховані координати середини c_i , а також значення лівої S_L та правої S_{Π} площ (табл. 3).

Таблиця 3

Координати середини сегментів для п'яти частин кривої

Номер	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(4; 7,232)	(7,232; 9,399)	(9,399; 11,148)	(11,148; 12,655)	(12,655; 14)
c_i	5,694724	8,339453	10,28623	11,90988	13,33344

Ліва і права площі однакові (табл. 4).

Таблиця 4

Значення площ для п'яти частин кривої

Номер точки	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(4; 5,695)	(5,695; 7,232)	(7,232; 8,339)	(8,339; 9,399)	(9,399; 10,286)
S	57,49712	57,49712	38,48464	38,48464	31,05328
Номер точки	1	2	3	4	5
$(x_{i-1}; x_i)$	(10,286; 11,148)	(11,148; 11,91)	(11,91; 12,655)	(12,655; 13,333)	(13,333; 14)
S	31,05328	26,75872	26,75872	23,86834	23,86834

Припустимо, що координата контрольної точки умовної реперної мережі (полюс P) дорівнює $(-10; -80)$. За допомогою

апроксимованої функції та формул (2) і (3) визначено полярні координати (φ та p), наведено в табл. 5 і на рис. 4.

Таблиця 5

Полярні координати середніх точок для полюса $(-10; -80)$

Координата	Номер точки				
	1	2	3	4	5
c_i	5,694724	8,339453	10,28623	11,90988	13,33344
$y(c_i)$	-92,0248	-237,8465	-380,94	-523,4714	-665,7896
φ	-37,4582	-83,37278	-86,14355	-87,17158	-87,71897
p	19,7717	158,9083	301,623	444,0123	586,2541

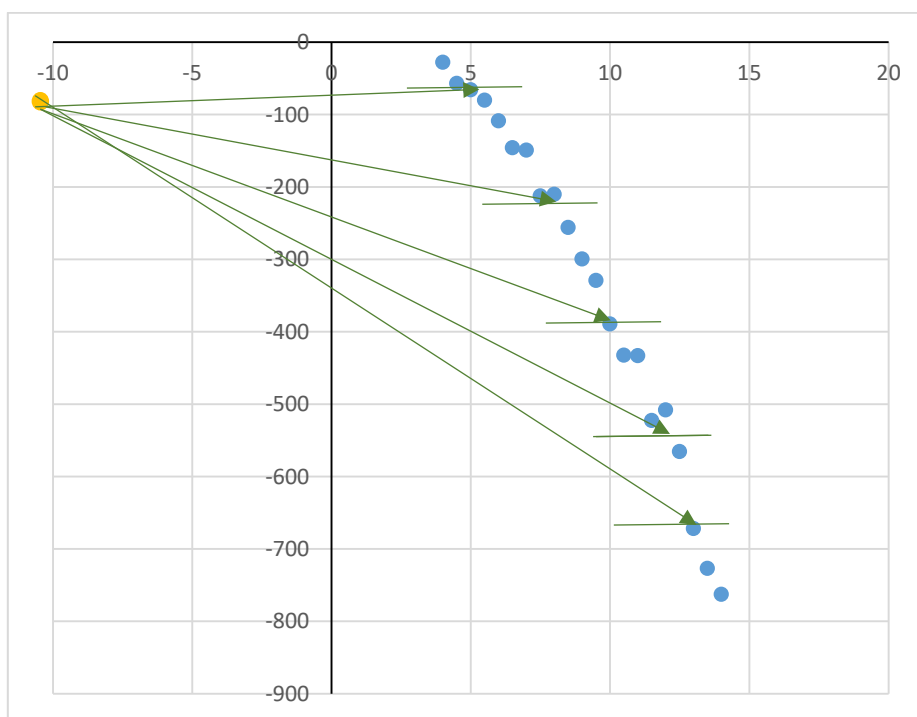


Рис. 4. Геодезична розмітка залізничної кривої для полюса $(-10; -80)$

Використовуючи описаний вище алгоритм, отримуємо полярні координати

для іншої полюсної відстані OP (0; -500). Розрахунок наведено в табл. 6 та на рис. 5.

Таблиця 6

Полярні координати середніх точок для полюса (0; -500)

Координата	Номер точки				
	1	2	3	4	5
c_i	5,694724	8,339453	10,28623	11,90988	13,33344
$y(c_i)$	-92,0248	-237,8465	-380,94	-523,4714	-665,7896
φ	89,20029	88,17796	85,06217	-63,09579	-85,40195
p	408,0149	262,2861	119,5035	26,32017	166,3249

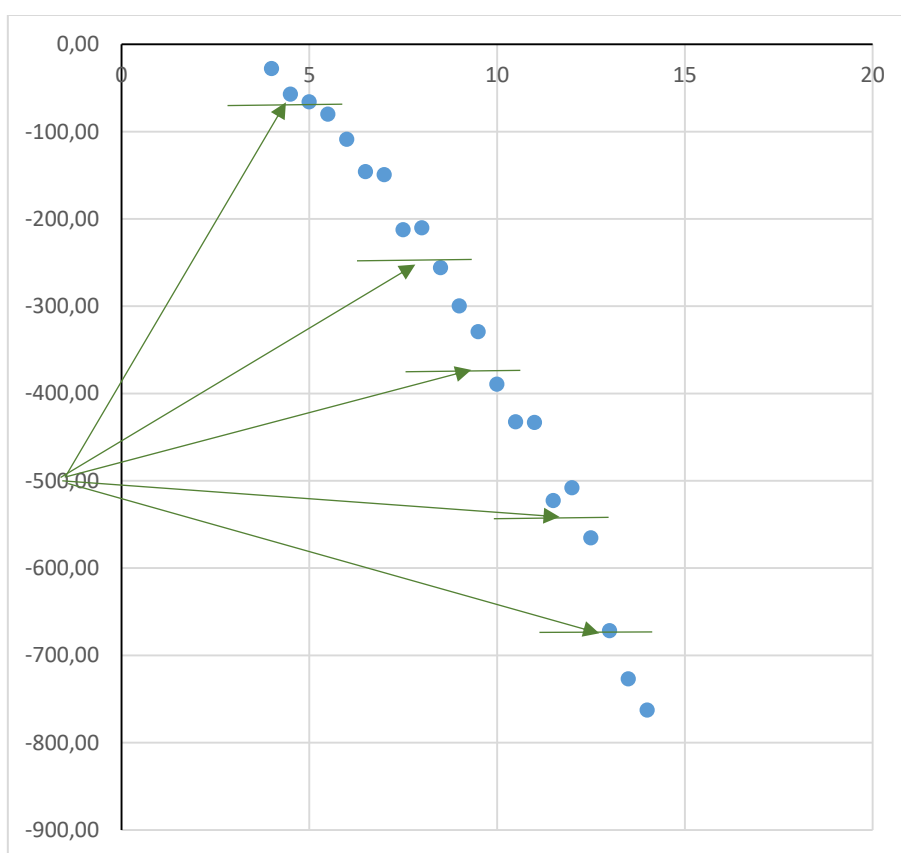


Рис. 5. Геодезична розмітка залізничної кривої для полюса (0; -500)

Відповідно до отриманих результатів запропонований метод дозволяє легко розрахувати координати кривої з будь-якої точки умовної реперної мережі залізниці. Надалі ремонтники використовуватимуть ці контрольні точки залізничної кривої, що дозволяє легко привести зміщені криві в проектне положення. Горизонтальне

відхилення показує, наскільки вісь колії відхилилася від проектної осі колії. Наприклад, колієвимірвальна машина визначила, що відхилення становить 180 мм. Це означає, що колію потрібно перемістити на 180 мм. Оскільки горизонтальне відхилення не впливає на кут, необхідно лише додати відхилення до довжини p

променя P_i від полюсної точки мережі умовного репера залізниці та виконати корегування колії.

Висновки. Створення «власної» умовної реперної мережі дозволяє залізницям виконувати розбиття ліній і кривих незалежно від наявності чи віддаленості контрольних точок місцевої чи державної геодезичної мережі. У статті розроблено математичне обґрунтування розміщення власних реперів біля залізниці. Після вибору умовного репера були проведені розрахунки координат залізничної кривої, розділеної на п'ять частин. Показано, що кількість точок не впливає на точність визначення координат.

Отже, можна відмовитися від меншої кількості реперів, що збільшує швидкість розбиття. Визначено полярні координати для двох полюсних відстаней від умовного репера. Встановлено, що використання теореми про середнє значення інтегрального числення для знаходження координат точки дає більш точні дані, оскільки цей метод не передбачає заміни дуги хордою. Описаний спосіб визначення полярних координат з будь-якої точки власної мережі умовних реперів має практичне значення. Після відхилення осі колії внаслідок руху поїздів ремонтники можуть поставити її в проектне положення без додаткового розрахунку.

Список використаних джерел

1. Celms A., Parsova V., Reke I., Akmentins J. Tendencies of development of local geodetic network in Riga city. *Baltic Surveying*. 2018. Vol. 9. P. 8-15. URL: <http://dx.doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2018.013> (last access: 01.08.2022).
2. Celms A., Reke I., Brinkmanis-Brimanis M., Pukite V. 2019. Evaluation of the Local Geodetic Network in Jurmala City. *Baltic Surveying*. 2019. Vol. 10. P. 8-15. URL: <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2019.001> (last access: 01.08.2022).
3. Kriauciunaite-Neklejonoviene V., Rekus D., Balevicius G., Kolbovskij O. Technology of Geodetic Control at Railway Construction Stages. *Baltic Surveying*. 2018. Vol. 8. P. 52-60. URL: <https://doi.org/10.22616/j.balticsurveying.2018.007> (last access: 01.08.2022).
4. Bartonek D., Bures J., Svabensky O. Optimized GNSS RTK measurement planning for effective point occupation via heuristic analysis. *Engineering Computations*. 2015. Vol. 34 (1). P. 0352. URL: <https://doi.org/10.1108/EC-11-2015-0352> (last access: 01.08.2022).
5. Xinlong W., Yafeng L. Study on adaptability of GPS ionospheric error correction models. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2009. Vol. 81 (4). P. 316-322. URL: <https://doi.org/10.1108/00022660910967309> (last access: 01.08.2022).
6. Ho M. D., Muravyov S. V. Accuracy enhancement of measurand estimate on the base of additive combined measurements. *Sensor Review*. 2020. Vol. 40 (3). P. 377-383. URL: <https://doi.org/10.1108/SR-01-2020-0009> (last access: 01.08.2022).
7. Postek P. New Computer Simulation Method for First-Order Design of Geodetic Network: Aiming for Low Cost. *Journal of Surveying Engineering*. 2021. Vol. 147 (1). P. 04020020. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000334](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000334) (last access: 01.08.2022).
8. Třasák P., Štroner M. Outlier detection efficiency in the high precision geodetic network adjustment. *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2014. Vol. 49. P. 161-175. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40328-014-0045-9> (last access: 01.08.2022).
9. Nowak E., Odziemczyk W. Impact analysis of observation coupling on reliability indices in a geodetic network. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*. 2018. Vol. 106 (1). P. 1-7. URL: <http://dx.doi.org/10.2478/rgg-2018-0008> (last access: 01.08.2022).
10. Soilán M., Sánchez-Rodríguez A., Del Río-Barral P., Perez-Collazo C., Arias P., Riveiro B. Review of laser scanning technologies and their applications for road and railway infrastructure

monitoring. *Infrastructures*, 2019. Vol. 4 (420). P. 58. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/infrastructures4040058> (last access: 01.08.2022).

11. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of terrestrial laser scanning in the architecture, engineering and construction industry. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (1). P. 265. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/s22010265> (last access: 01.08.2022).

12. Yan G., Li Y., Liu C. Multiple incompatible datum points identification in vertical control network for high-speed railway based on likelihood ratio test. *Journal of Applied Geodesy*. 2022. Vol. 16 (1). P. 1-8. URL: <https://doi.org/10.1515/jag-2021-0008> (last access: 01.08.2022).

13. Zhang D., Fang T., Ai J., Wang Y., Zhou L., Guo J., Mei W., Zhao Y. UAV/RTS system based on MMCPF theory for fast and precise determination of position and orientation. *Measurement*. 2022. Vol. 187. P. 110342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110342> (last access: 01.08.2022).

14. Mrówczyńska M., Sztubecki J. The network structure evolutionary optimization to geodetic monitoring in the aspect of information entropy. *Measurement*. 2021. Vol. 179. P. 109369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109369> (last access: 01.08.2022).

15. Kobryń A. Multicriteria Decision Making in Geodetic Network Design. *Journal of Surveying Engineering*. 2020. Vol. 146 (1). P. 04019018. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000301](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000301) (last access: 01.08.2022).

16. Niemeier W., Tengen D. Uncertainty assessment in geodetic network adjustment by combining GUM and Monte-Carlo-simulations. *Journal of Applied Geodesy*. 2017. Vol. 11 (2). P. 67-76. URL: <http://dx.doi.org/10.1515/jag-2016-0017> (last access: 01.08.2022).

17. Mrówczyńska M. Analysis of the horizontal structure of a measurement and control geodetic network based on entropy. *Geodesy and Cartography*. 2013. Vol. 62 (1). P. 23-31. URL: <https://doi.org/10.2478/geocart-2013-0002> (last access: 01.08.2022).

18. Kokeza Z., Vujasinović M. Development of software for geodetic network adjustment in open-source environment. *Савремена теорија и пракса у градитељству*. 2018. Vol. 13 (1). P. 260-271. URL: <http://dx.doi.org/10.7251/stp1813260k> (last access: 01.08.2022).

19. Xuan Vinh D. Analyzing the Displacement of Horizon Geodetic Network at Tuyen Quang Hydropower. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. 2019. Vol. 35 (3). P. 93-107. URL: <https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4398> (last access: 01.08.2022).

20. Alizadeh-Khameneh M. A., Andersson J. V. Geodetic Network Design in Tunnel Surveys. *Journal of Surveying Engineering*. 2020. Vol. 146 (4). P. 06020003. URL: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)su.1943-5428.0000325](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000325) (last access: 28.08.2022).

21. Ten Y., Oymatov R., Khayitov K., Saydalieva G., Nulloev U., Nematov I. Application of modern geodetic tools in the operation of railway reconstructions. *E3S Web of Conferences*, 2021. Vol. 227. P. 04004. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202122704004> (last access: 01.08.2022).

Мамонов Костянтин Анатолійович, доктор економічних наук, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. Тел.: (099) 291-73-54. ORCID 0000-0002-0797-2609.

Саяпін Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70. E-mail: sayarin09@ukr.net.

Орел Євген Федорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-6261-1558.

Камчатна Світлана Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com. ORCID 0000-0001-5711-4146.

Пустовойтова Оксана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: oksana_pustov@ukr.net. ORCID 0000-0003-4078-4834.

Mamonov Kostiantyn, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Land Administration and GIS O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, E-mail: kostia.mamonov2017@gmail.com. Tel.: (099) 291-73-54.

Saiapin Oleksandr, PhD, associate professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: sayapin09@ukr.net.

Orel Yevhen, PhD, associate professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: orel@kart.edu.ua.

Kamchatna Svitlana, PhD, associate professor, Department of Research and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management, *Ukrainian State University of Railway Transport*. Tel.: (057)730-10-70. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.

Pustovoitova Oksana, PhD (Tech.), Associate Professor, Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy. Tel.: (057) 707-31-10. E-mail: oksana_pustov@ukr.net.

Статтю прийнято 31.08.2022 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 656.6:629.067

ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ МОРСЬКОГО СУДНА

Кандидати техн. наук О. М. Мельник, А. О. Волошин, д-р техн. наук О. А. Онищенко, канд. техн. наук О. В. Щербина, канд. геогр. наук Н. В. Васалатій, старш. викл. П. В. Нікітюк

INFORMATION SECURITY ARRANGEMENTS OF SEAGOING SHIP

PhD (Tech.) O. Melnyk, A. Voloshyn, D. Sc. (Tech) O. Onishchenko, PhD (Tech.) O. Shcherbina, PhD (Geog.) N. Vasalatii, Senior Lecturers P. Nykytyuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.201.2022.267758>



***Анотація** Питання забезпечення безпеки сучасного транспортного флоту пов'язане насамперед із захистом інформації від несанкціонованого доступу та запобігання її витоку. Кожний судовласник, дбаючи про збереження конфіденційності даних, не тільки зменшує ризик і можливі збитки від їхнього витоку, але й підвищує рівень довіри в очах своїх клієнтів і партнерів. Якісні та кількісні зміни, а також впровадження інформаційних технологій, що відбувається на морських судах останнім часом, значно підвищили безпеку їхньої експлуатації та покращили умови безперервної роботи, посприявши тому, що сучасне судноплавство стало великою мірою залежати від інформаційного забезпечення, яке є важливим елементом у процесах керування судном та експлуатацією його технічних систем. Застосування нових морських цифрових інформаційних систем на основі мережевої передачі навігаційних даних також стало суттєвим кроком на шляху до підвищення забезпечення безпеки мореплавства. Це дозволяє своєчасну обробку великих обсягів інформації для функціонування навігаційних систем судна. Такі системи дозволяють виключити прийняття рішення щодо керування судна, що ґрунтується на основі неповної або недостовірної інформації та зумовлює вжиття спеціальних заходів для забезпечення безпеки судна. У статті подано аналіз основних факторів, що становлять загрозу та вплив на забезпечення інформаційної безпеки судна. На основі концептуальної моделі виділено основні фактори впливу на стан кібербезпеки судна.*

***Ключові слова:** захист інформації, безпека судна, судові системи, витік даних.*

***Abstract** Security of modern transport ships is primarily related to the protection of information from unauthorized access and prevention of leakage. Every shipowner, by protecting the confidentiality of data, not only reduces the risk and possible losses from its leakage, but also increases the level of trust in the eyes of its customers and partners. The quality and quantity changes, which have taken place in recent years on seagoing vessels, have significantly contributed to the safety of their operation and the smooth running of their operations. Modern ship navigation is heavily dependent on information support, which is an important element in ship handling processes. New marine digital information systems are being deployed based on digital data exchange, to ensure navigational safety. This allows immediate processing of summaries of information for the functioning of the ship's navigation systems. In addition, these systems provide the ability to exclude*

the decision-making process for ship management based on incomplete or unreliable information and require the maintenance of special measures to ensure its safety. Therefore, the task in the sphere of cyber security in maritime transport is the development of means of protection of information resources of the vessel, which is one of the first and urgent. Given these factors and the current situation, the international maritime organization has developed and adopted a number of maritime industry security documents that are designed to address a number of provisions and issues related to cybersecurity of ship and ship operations. The purpose of this article is to analyze main factors influencing ship's information security. And on the basis of the presented conceptual model of ship security the main factors influencing the information security of the ship are identified.

Keywords: *information security, ship security, data protection; ship systems.*

Вступ. Цифрова трансформація морської галузі – подія, що фактично відбулася. Сьогодні морські транспортні судна використовують комп'ютерні та кіберзалежні технології для навігації, керування судном, судовими технічними системами та системами зв'язку, вантажними операціями, здійсненням контролю за станом доквілля та для багатьох інших цілей. Системи спостереження судна, такі як моніторинг безпеки, виявлення пожеж і порушення герметичності корпусу, все більше залежать від кібертехнологій. Тому кібербезпека є однією з важливих складових у системі забезпечення безпеки судна та судноплавства в цілому, а кібератаки на морський транспорт – цілком актуальною проблемою, що потребує постійної уваги. До речі, з подальшим розвитком інформаційних технологій обумовлені ризики лише збільшуватимуться. На думку експертів, з часом потенційних каналів і можливостей для хакерських атак ставатиме все більше, їхні види варіюватимуться і видозмінюватимуться, що вчергове підкреслює роль кібербезпеки морського судна як невід'ємного елемента в системі забезпечення безпеки судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення інформаційного захисту судна – це перш за все його захист від кібератак. Кібернетична атака – ніщо інше, як будь-яка несанкціонована дія, здійснена безпосередньо на суднове обладнання або, наприклад, опосередковано на електронний пристрій і через нього на

суднову систему загалом. Будь-яка ланка в системі критично важливого суднового обладнання, включаючи бездротові канали зв'язку, може стати вразливою. У результаті відбувається активізація властивостей та інших інтегрованих в апаратуру функцій, що у свою чергу може призвести до різних спотворень і збоїв у роботі на численних етапах обробки, перетворення та подання інформації в різному судновому обладнанні [1, 2, 8, 9]. Важливо відзначити, що судно може бути схильним до хакерської атаки не тільки перебуваючи в порту, а й у відкритому морі. Кібератака може бути спрямована практично на все суднове обладнання, від навігаційних і радарних систем до електронних карт. Вона може проходити за класичним сценарієм, коли відбувається напад на систему INMARSAT (Міжнародна організація морського супутникового зв'язку) та аналогічне обладнання супутникового зв'язку. Зловмисникам досить вузької смуги пропускання каналу і короткого сеансу зв'язку, під час якого зазвичай судна роблять регулярний звіт, наприклад передають телеметричну інформацію про параметри руху судна, його обладнання, порти, стан вантажу і деталі маршруту [9]. Прогресуюча цифровізація морського транспорту несе нові загрози [3, 6, 7] і зумовлює ризики, виникаючі в системі морського транспорту [5, 12, 18]. Зокрема основи кібербезпеки критичної інфраструктури та морського сектору відіграють ключову роль [13-16].

Отже, все більш особливого значення набувають питання кібербезпеки на морі та

забезпечення цифрової безпеки морських маршрутів, а також майбутні правові проблеми, що очікуються в галузі. Особливий інтерес також становлять заходи протидії загрозам морських кібератак, рівень готовності до організації забезпечення кібербезпеки на морі в портах, а також порівняння практики різних країн.

Мета та завдання дослідження. Мета статті полягає в дослідженні існуючих засобів захисту інформаційних ресурсів судна, встановленні зв'язку між критичними системами судна та ідентифікованими ризиками в рамках забезпечення інформаційної безпеки судна. Для досягнення цієї мети необхідно провести аналіз основних загроз інформаційній безпеці судна, вивчити фактори, що спричиняють вплив на її забезпечення, і розробити концептуальну модель безпеки судна та ідентифікувати основні фактори впливу на стан цієї безпеки.

Основна частина дослідження. Вразливими об'єктами судна, з погляду кібербезпеки, є різні системи судна, що сьогодні керуються та контролюються відповідним програмним забезпеченням, інформаційними системами.

Слід відзначити, що в джерелах наводяться різні погляди на склад цих систем, але здебільшого ці підходи збігаються.

Так, основними системами вантажного судна, вразливими для кібератак, є:

- системи навігаційного містка;
- системи управління рухом та механізмами;
- електронні системи відображення карт та інформації (ECDIS);
- автоматична ідентифікаційна система (AIC);
- системи контролю доступу на судно;
- системи управління вантажними операціями;
- системи контролю суднової енергетичної установки;
- адміністративні системи та системи життєзабезпечення екіпажу;
- системи зв'язку.

Деякі компоненти з наведеного вище списку виділені як окремі системи (наприклад система контролю доступу, управління сигналізацією, управління підрулюючими пристроями) (рис. 1).

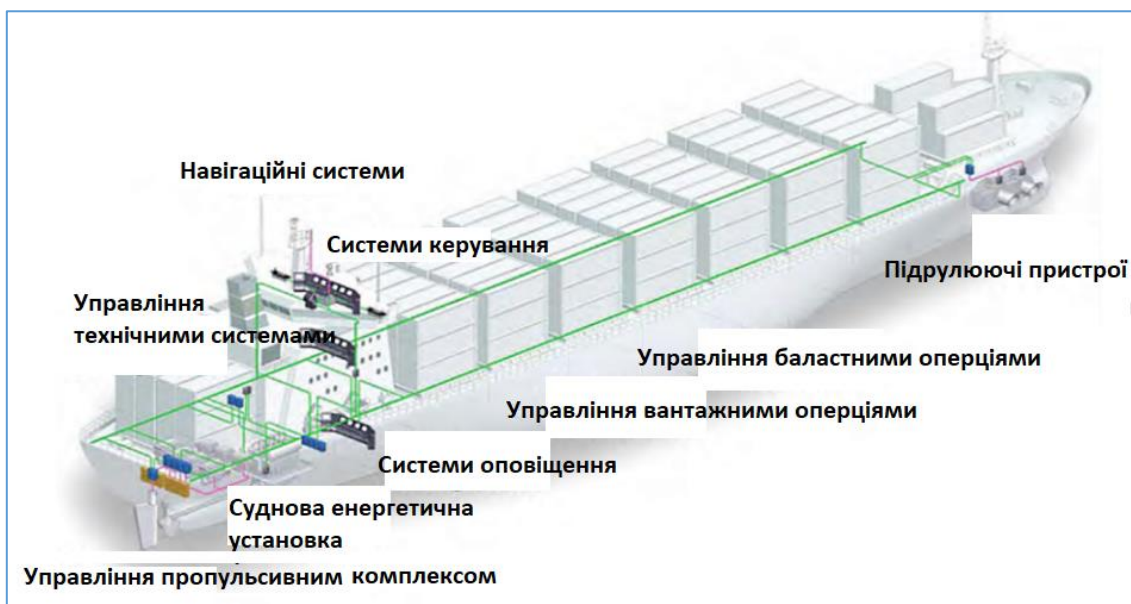


Рис. 1. Основні системи судна

Під засобами забезпечення інформаційної безпеки судна прийнято розуміти сукупність заходів, спрямованих на забезпечення цілісності, доступності і, якщо необхідно, конфіденційності інформації та ресурсів, що використовуються для її обробки.

Сучасні суднові інформаційні системи надають таку інформацію:

- дані про судно (поточне місце, кінематичні параметри, попередній шлях, запланований маршрут і ряд інших елементів);

- радіолокаційне зображення та кінематичні параметри цілей з засобів автоматичного радіолокаційного прокладання;

- дані з автоматичної ідентифікаційної системи про інші судна;

- відомості про навігаційні огорожі, оптичні та радіотехнічні навігаційні засоби, настанови для плавання;

- інформацію берегових систем управління рухом;

- гідрометеорологічні відомості про поточний стан погоди, дані про льодову обстановку, прогноз тощо.

Особливу небезпеку кібератаки можуть мати для критичних систем судна або обладнання, раптова відмова якого може створювати небезпечні ситуації на судні, тому вони є життєво важливими для функціонування судна (рис. 2).

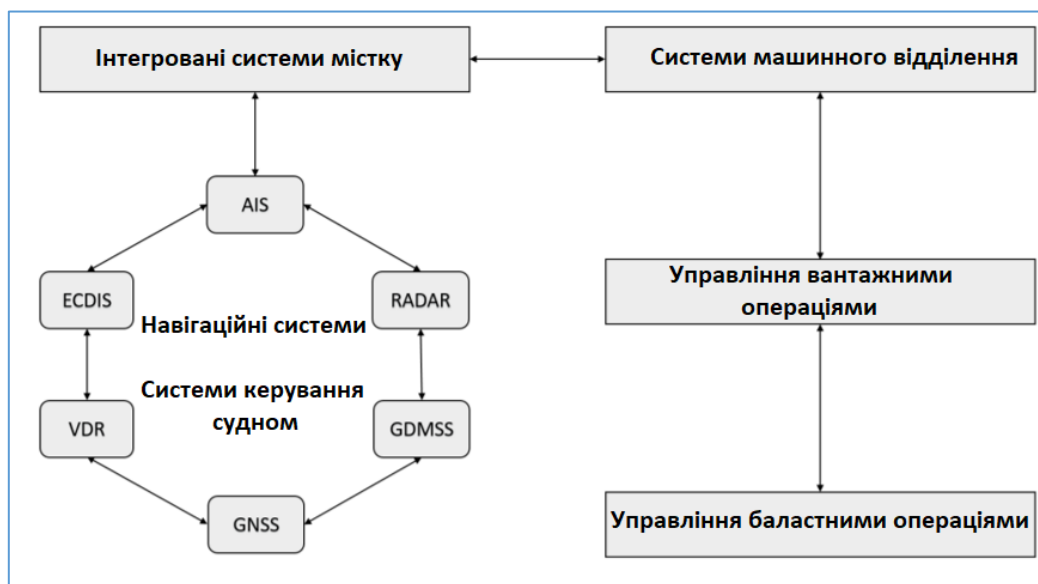


Рис. 2. Критичні системи судна

Так, основними системами вантажного судна, вразливими перед кібератаками, є:

- системи навігаційного містка (реєстрації даних рейсу - VDR);

- електронні системи відображення карт та інформації (ECDIS);

- системи автоматичної ідентифікації (AIS);

- системи супутникового позиціонування (GNSS);

- системи управління вантажами;

- системи радіолокаційного спостереження (RADAR);

- системи зв'язку в разі лиха та для забезпечення безпеки (GMDSS).

Слід відзначити, що недоліком сучасних систем управління морськими транспортними суднами є висока частка участі людини у процедурі прийняття рішень і велика залежність процесу управління від психофізичного стану

штурмана-судноводія. Ключовим моментом при розгляді питань, що стосуються забезпечення безпеки інформаційних систем, є виняткова важливість і необхідність використання системного підходу до вирішення цієї проблеми. Це пояснюється тією обставиною, що безпека системи в цілому обумовлюється безпекою її найслабшої ланки. У зв'язку з цим набуває принципової важливості розгляд проблеми в комплексі, інакше вжиті заходи не принесуть очікуваного ефекту або виявляться надмірними та невиправдано дорогими.

Іншим важливим моментом під час вирішення питань безпеки інформаційних систем судна є принцип дотримання балансу. Слід чітко розуміти, що забезпечення абсолютної безпеки практично неможливе. Захистити від усього різноманіття загроз неможливо з цілої низки причин, серед яких досить назвати лише деякі:

- абсолютний захист зробить інформаційну систему практично

недоступною та непридатною для використання;

- не всі можливі шляхи подолання загроз системі забезпечення безпеки можуть бути відомі і, отже, не всім загрозам може протистояти застосована система забезпечення безпеки;

- безпека комп'ютерних систем судна залежить від «людського фактора».

Отже, ще раз необхідно підкреслити, що будь-які заходи не можуть гарантувати абсолютної безпеки. З цієї причини слід досягати такого співвідношення складності системи забезпечення безпеки та реальних умов функціонування інформаційних систем, що не призводило б до перевищення вартості розроблення, впровадження, експлуатації та обслуговування системи забезпечення безпеки над масштабами можливої шкоди в разі її порушення. Концептуальна модель безпеки судна подана на рис. 3.

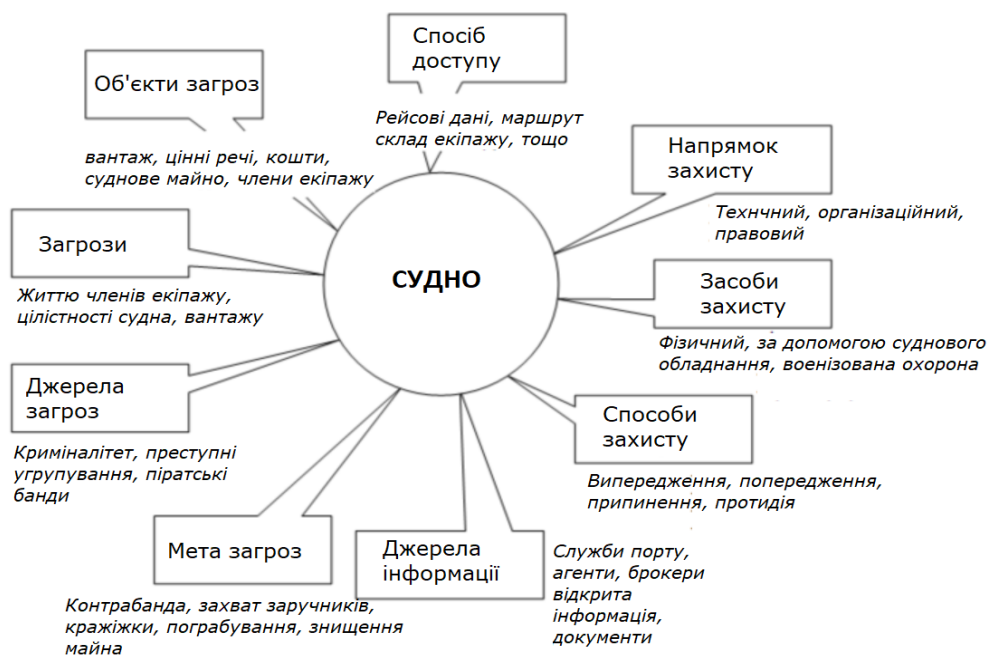


Рис. 3. Концептуальна модель безпеки судна

Втім існують два основних варіанти щодо забезпечення безпеки суднової

інформації: самостійний та з залученням фахівців-консультантів. Перший підхід

виявив свою неспроможність у сучасних умовах через неможливість передбачити всі можливі ймовірні загрози та розмір еventуальної шкоди від їхнього прояву, що визначає жорсткі вимоги до питання захисту інформації, і другий підхід - експертний, що передбачає більш професійний рівень.

Пристаюючи до вирішення завдання з забезпечення інформаційної безпеки судна, необхідна побудова її моделі і чітке визначення проблем. При цьому формальну модель на першому етапі бажано розглядати на концептуальному рівні, не зупиняючись на конкретних особливостях інформаційних систем. Далі після розгляду принципів стратегії розроблення системи забезпечення безпеки рекомендується перейти до реального змісту концептуальних положень, і здебільшого такий підхід є виправданим.

Найважливішим фактором при побудові формальної моделі безпеки є поняття «середовище безпеки». Необхідність введення цього терміна визначається тим, що безпека інформаційної системи судна не може забезпечуватися за будь-яких умов. Отже, поняття «середовище безпеки» служить для обмеження (визначення) сфер безпеки судових систем. У багатьох дослідженнях проблеми безпеки інформаційних систем у складі середовища безпеки виділяють кілька самостійних компонентів, кожен з яких утворює певну сферу безпеки, що відповідає тому чи іншому аспекту забезпечення безпеки. Іншими словами, ці сфери дозволяють декомпозувати проблему забезпечення безпеки судових систем і вирішувати її частинами.

На жаль, проблеми інформаційної безпеки судна найчастіше відносять до другорядних або взагалі змішують їх із загальними проблемами безпеки та автоматизації. При цьому передбачається, що в разі виникнення проблем, пов'язаних з порушенням конфіденційності, цілісності інформації, вдасться вжити своєчасних і адекватних заходів, однак, як свідчить

практика, такий підхід не є виправданим з приводу того, що:

1) раптовість атаки може призвести до таких наслідків, що реакція на неї вже не матиме сенсу;

2) при описаному вище підході керівництво перебуває у стані очікування будь-яких порушень інформаційної системи як наслідку інформаційної атаки. Якщо говорити про витік інформації, то зазвичай подібні факти виявляються з великим запізненням. До моменту прояву і згодом можна буде лише констатувати про відсутність своєчасно вжитих заходів захисту;

3) вживання заходів захисту в терміновому порядку може призвести до неадекватної оцінки ситуації з боку екіпажу судна, що, безсумнівно, позначиться на якості його роботи. Крім того, якість будь-якого рішення в умовах дефіциту часу знижується, і швидше за все створити оптимальну систему захисту даних не вдасться.

Сучасний підхід до захисту інформації від несанкціонованого доступу полягає в комплексному застосуванні організаційних і технічних заходів. Заходи для забезпечення безпеки конфіденційної інформації проводяться, як правило, у трьох основних напрямках: захист від витоку інформації з технічних каналів, захист від несанкціонованого доступу до комп'ютерної інформації, обмеження вільного доступу сторонніх осіб до приміщень, де встановлено судові критичне обладнання. Комплекс заходів, необхідних для забезпечення безпеки інформації, визначається виходячи з необхідного рівня захищеності конкретного об'єкта і допустимого рівня ризику, тому на попередньому етапі при розробленні плану захисту має проводитися визначення ймовірних загроз і розмірів можливих збитків від їхнього прояву. Крім того, необхідно враховувати гарантію безконфліктності функціонування встановлених засобів захисту для

забезпечення надійності загальної системи захисту. Зрештою неможливо побудувати систему інформаційної безпеки без урахування вимог нормативних документів, яких чимало, тому необхідне як глибоке знання змісту документів, так і певний досвід практичної діяльності з їх використання.

Щодо базових принципів забезпечення інформаційного захисту, то необхідно відділити такі:

- цілісність даних – захист від збоїв, що призводять до втрати інформації, захист від неавторизованого створення і знищення даних;

- конфіденційність інформації та доступ до неї авторизованих користувачів.

Також можна виділити кілька основних етапів створення комплексної системи захисту інформації, однак насамперед доцільно з'ясувати і визначити загрози інформаційній безпеці та можливі збитки, яких вони можуть завдати після прояву, тобто аналіз ризиків. Основні проблеми під час проведення такого аналізу виникають у зв'язку зі складністю визначення кількісного значення ймовірності прояву тих чи інших загроз і розміру можливих збитків від їхнього впливу. Тому захищеність інформації на судні описується якісними показниками, набір яких визначається спеціальними методиками.

З аналізу ризиків розробляється план захисту, що містить повний опис усіх рекомендованих заходів для захисту інформації:

- інструкція для керівництва компанії;

- модель потенційних загроз;

- економічне обґрунтування запропонованих рекомендацій;

- календарні план впровадження систем захисту;

- перелік відомостей, що становлять комерційну таємницю;

- перелік організаційних заходів і документів;

- рекомендації щодо виконання вимог керівних документів.

Склад технічних засобів визначається на основі чітких критеріїв, що виділяються як рекомендації щодо вибору засобів захисту. Наступним етапом після виявлення можливих загроз і визначення заходів щодо їхньої нейтралізації є створення спеціального підрозділу в компанії або відповідальної особи, яка відповідає за виконання плану захисту суден, і визначення завдань, чисельності, складу технічних засобів, характеру та режиму взаємодії його з іншими службами.

Регулювання взаємовідносин членів екіпажу щодо правил і режиму використання спеціальних технічних засобів при вирішенні завдань інформаційної безпеки є ще одним видом завдань для професійної організації системи захисту інформації на судні, тому регламентуючі документи, що стосуються організації систем захисту, мають розглядати всі можливі ситуації, пов'язані з експлуатацією судових інформаційних систем.

Висновки. Для побудови ефективної системи захисту та інформаційної безпеки судна необхідне проведення ретельного аналізу законодавчої бази та сучасних існуючих засобів захисту інформації в інших галузях. У статті ідентифіковано основні фактори загрози інформаційній безпеці судна та досліджено їхній вплив на процес експлуатації судна, вивчено пропозиції щодо подолання загроз з урахуванням різних сценаріїв за допомогою розроблених і прийнятих документів з забезпечення кібербезпеки в морській галузі. Подано аналіз основних факторів, що становлять загрозу та впливають на забезпечення інформаційної безпеки судна. На базі запропонованої концептуальної моделі забезпечення безпеки судна акцентовано увагу на основних факторах впливу на стан інформаційної безпеки судна, що дозволяє здійснити правильний вибір методів і засобів захисту інформації та організувати оптимальну і гнучку систему

безпеки і необхідний рівень її надійності та захищеності.

Подальшими кроками є реалізація єдиних підходів щодо інтеграції систем зв'язку, навігації, гідрометеорологічного забезпечення з метою створення єдиного інформаційного простору на основі сучасних цифрових технологій. Також

подальший розвиток сучасних інформаційних технологій і їх впровадження на сучасних суднах в елементах суднового навігаційного обладнання має бути узгоджено та скоординовано з береговими інформаційними системами і мати єдині стандарти для їхнього ефективного сумісного використання.

Список використаних джерел

1. Progoulakis I., Rohmeyer P., & Nikitakos N. 2021. Cyber Physical Systems Security for Maritime Assets. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12):1384. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse9121384>.
2. Lagouvardou S., 2018. Maritime Cyber Security: concepts, problems and models. Master thesis. Technical university of Denmark. 128 p.
3. Kardakova Maria & Shipunov Ilya & Nyrkov A. & Knysh Tatyana. (2020). Cyber Security on Sea Transport. 10.1007/978-3-030-19756-8_46.
4. Nyrkov A., Goloskokov K., Koroleva E., et al. Mathematical models for solving problems of reliability maritime system. *Advances in Systems, Control and Automation. LNEE*. Vol. 442 (2018). URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4762-6_37.
5. Iris Malone and Anastasia Strouboulis (2021). Emerging Risks in the Marine Transportation System (MTS), 2001-2021 The National Counterterrorism Innovation, Technology, and Education (NCITE) Center. 70 p.
6. Kala N. and Mahesh Balakrishnan. Cyber Preparedness in Maritime Industry. *International Journal of Scientific and Technical Advancements*. Vol. 5, Is. 2. 2019. P. 19-28.
7. Melnyk O., Onyshchenko S., Koryakin K. (2021) Nature and origin of major security concerns and potential threats to the shipping industry. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 113. P. 145-153. ISSN: 0209-3324. URL: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2021.113.11>.
8. Ships infected with ransomware, USB malware, worms. URL: <https://www.zdnet.com/article/ships-infected-with-ransomware-usb-malware-worms/>.
9. Hyra Bartłomiej. Analyzing the Attack Surface of Ships In DTU Compute Department of Applied Mathematics and Computer Science. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2019.
10. Maritime cybersecurity project. (2018) Maritime Security Center. American Bureau of Shipping. URL: https://www.stevens.edu/sites/stevens_edu/files/files/MS/ABS_Maritime%20CybersecurityFinalProject%20Report.pdf.
11. Melnyk O., Onyshchenko S., Pavlova N., Kravchenko O., Borovyk S. (2022) Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System. *International Journal of Computer Science and Network Security*. Vol. 22 (03). P. 135-140. URL: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18>.
12. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V., Dovidenko Yu. Basic aspects of ensuring the shipping safety. *Scientific Journal of Silesian University of Technology*.

Series Transport. 2022. 115. P. 11-22. ISSN: 0209-3324. URL: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.115.1>.

13. Juan Ignacio Alcaide, Ruth Garcia Llave, Critical infrastructures cybersecurity and the maritime sector. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 45. P. 547-554. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.058>.

14. Коровин А. (2007). Обеспечение безопасной эксплуатации танкерного флота в районах разработки континентальных шельфов арктических морей. *Вестник камчатского государственного университета*. 2007. (6). С. 54-56.

15. Мельник О. М., Бичковський Ю. В. Сучасна методика оцінки рівня безпеки судна та шляхи його підвищення. *Розвиток транспорту*. 2021. № 2 (9). С. 37-46. URL: <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.03>.

16. Обеспечение безопасности плавания судов и предотвращение загрязнения окружающей среды / В. И. Дмитриев, В. Е. Леонов, Б. Г. Химич и др.; под ред. В. И. Дмитриева, В. Е. Леонова. Херсон: ХГМА, 2012. 397 с.

17. Melnyk O., Onyshchenko S., Pavlova N., Kravchenko O., Borovyk S. (2022) Integrated Ship Cybersecurity Management as a Part of Maritime Safety and Security System. *International Journal of Computer Science and Network Security*. Vol. 22 (03). P. 135-140. URL: <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18>.

18. Melnyk O., Bychkovsky Yu., Shumylo O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Voloshyn A., Cheredarchuk N. Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV. P. 136-146. URL: <https://doi.org/10.21279/1454-864X-22-I1-015>.

Мельник Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: m.onmu@ukr.net. ORCID: 0000-0001-9228-8459.

Волошин Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: aavoloshin61@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3993-5826.

Онищенко Олег Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту, Національний університет «Одеська морська академія». Тел.: (048) 728-55-12. E-mail: oleganaton@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Щербина Ольга Василівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технологій морських перевезень, Одеський національний морський університет. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: olshcherbina@i.ua. ORCID: 0000-0002-9247-5972.

Васалатій Надія Василівна, кандидат географічних наук, доцент кафедри навігації і керування судном, Одеський національний морський університет. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: vnv0920@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7188-9922.

Никитюк Петро Володимирович, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет. Тел.: (048) 732-06-38. E-mail: gelaevnyk@gmail.com. ORCID: 0000-0002-5905-3807.

Melnyk Oleksiy Mykolayovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University. Tel.: (048) 732-06-38. E-mail: m.onmu@ukr.net. ORCID: 0000-0001-9228-8459. Voloshin Andriy Oleksandrovysh, PhD (Tech.), Professor, Head of Department, Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University. Tel.: (048) 732-06-38. E-mail: aavoloshin61@gmail.com. ORCID: 0000-0003-3993-5826.

Onishchenko Oleg Anatoliyovych, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Fleet Technical Operation, National University «Odesa Maritime Academy». Tel.: (048) 728-55-12. E-mail: oleganaton@gmail.com. ORCID: 0000-0002-3766-3188.

Shcherbina Olha Vasilivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Fleet Operation and Shipping Technology, Odesa National Maritime University. Tel.: (048) 732-06-38. E-mail: olshcherbina@i.ua. ORCID: 0000-0002-9247-5972.

Vasalatii Nadiia Vasilivna, PhD (Geog.), Associate Professor, Department of Navigation and Ship Control, Odesa National Maritime University. Tel.: (048) 732-06-38. E-mail: vnv0920@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7188-9922.

Nykytyuk Petro Volodymyrovych, Senior Lecturer, Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University. Tel.: (048) 732-06-38. E-mail: gelaevnyk@gmail.com. ORCID:0000-0002-5905-3807.

Статтю прийнято 05.09.2022 р.

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

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 201

Збірник наукових праць УкрДУЗТ включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що входять 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 Новікова М. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 30.09.2022 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 6,5. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.