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 188

Харків 2019

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.

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 профиль: https://scholar.google.com.ua

Веб-сторінка збірника: http://znp.kart.edu.ua

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 № 8 від 03 грудня 2019 р.

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

ISSN 1994-7852
Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20. Rue Bachaumont, 75002 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет залізничного транспорту, 2019

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ
Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

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

Транспортні технології (275)

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

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 ХПІ)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-Universitet Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)

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

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)
Тимофеєв С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеєва Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ, м. Чернігів)

Теплоенергетика (144)

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

ЗМІСТ

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Атинян А. О., Буханова К. С., Трикоз Л. В., Камчатна С. М. Дослідження впливу тонкодисперсного вермикулітового порошку на структуру гіпсового в'яжучого методом електронної мікроскопії 6

Бідаков А. М., Пустовойтова О. М., Распопов Є. А., Страшко Б. О. Чисельний аналіз міцності з'єднань на вклеєних стержнях у CLT панелях 15

Залізничний транспорт (273)

Михалків С. В., Бульба В. І. Прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів дискретними стохастичними моделями 23

Транспортні технології (275)

Войтків С. В. Компонувальні схеми перспективних пасажирських купейних спальних вагонів класу 1-СВ 36

Ковтун П. В., Дубровская Т. А. Оценка стоимости пассажиро-часа при введении скоростного движения 45

Сахно В. П., Шарай С. М., Поляков В. М., Дехтяренко Д. О., Бабина Д. А. Теоретичні засади використання змішаного методу багатокритеріального аналізу для маршрутизації перевезень вантажів 50

Запара В. М., Запара Я. В., Хворостянна Я. О., Лейба І. О. Аналіз факторів несхоронності вантажів при перевезенні залізничним транспортом України 62

Бутько Т. В., Костєнніков О. М., Прохоров В. М., Шапатіна О. О. Розробка автоматизованої технології планування інтермодальних перевезень на основі векторної оптимізації 71

УДК 691-405.8:666.914

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОНКОДИСПЕРСНОГО ВЕРМИКУЛІТОВОГО ПОРОШКУ НА СТРУКТУРУ ГІПСОВОГО В'ЯЖУЧОГО МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ

Канд. техн. наук А. О. Атинян, асп. К. С. Буханова, д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук С. М. Камчатна

THE IMPACT STUDY OF THE FINE-DISPERSED VERMICULITE POWDER ON THE GYPSUM BINDER STRUCTURE BY THE SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

PhD (Tech.) A. O. Atynian, postgraduate student K. S. Bukhanova, D. Sc. (Tech.) L. V. Trykoz, PhD (Tech.) S. M. Kamchatnaya

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206080

У статті досліджується вплив фракцій тонкодисперсного вермикуліту на мікроструктуру гіпсового в'яжучого, оскільки саме вона визначає фізико-механічні й теплотехнічні властивості кінцевого гіпсового виробу. Показано, що добавка тонкодисперсного вермикулітового порошку фракції 0,01 мм у кількості 2 % від маси гіпсу є оптимальною для формування щільної мікроструктури гіпсового каменю. Методом скануючої електронної мікроскопії підтверджено утворення однорідної суцільної структури із щільним розташуванням кристалів гіпсу.

Ключові слова: *в'яжуче гіпсове, вермикуліт, міцність при стиску, структура, скануюча електронна мікроскопія.*

The article aims the study of the structure formation of gypsum binder with the different fractions of non-organic aggregate – vermiculite powder. Two fineness degrees of vermiculite powder have been used with average size 0.14 mm and 0.01 mm. To determine the optimal amount of the aggregate, the gypsum binder samples are prepared in which the content of vermiculite powder is changed from 0 % to 8 %. After curing, a compression strength is defined the entire sample batches. The samples with 2 % of the aggregate demonstrate the maximal compression strength 25 MPa. This percentage has been used during following researches. To determine the impact of fineness degree on the filled gypsum material, three sample batches have been made. The first batch does not contain the aggregate, the second and third ones contain 2 % vermiculite powder with two types of dispersity. After curing, a compression strength has been defined the entire sample batches. As the testing results show, the addition of filler with average size 0.01 mm increase both the compression strength and a bending strength by 50 %. The fine-dispersed powder fills the cavities between the crystals of calcium sulfate dihydrate. It allows to increase the number of contacts between the crystals and enhance the strength of the sample. The investigation of the structure formation has been executed by scanning electron microscopy. The electron microscope photos of the gypsum samples and the aggregate with average size 0.14 mm demonstrate a nonuniform distribution of the structure elements. Also, a partial ties vermiculite and the gypsum crystals are observed. In opposite, the electron microscope photos of the gypsum samples and the aggregate with average size 0.01 mm show a uniform distribution of the structure elements.

Moreover, the branched structure with contact bonds between vermiculite and the gypsum crystals is found. The usage of vermiculite powder as a filler for the gypsum products rises an efficiency of constructions due to the bigger strength, improved thermal insulation, and fire-resisting property.

Keywords: *gypsum binder, vermiculite, compression strength, structure, scanning electron microscopy.*

Вступ. Сучасні тенденції й перспективи міського будівництва в першу чергу стосуються раціонального підходу до використання енергетичних ресурсів, комфортного мікроклімату в приміщеннях і зменшення впливу на навколишнє середовище. За останні кілька років в Україні підвищилась вартість енергоресурсів, що викликало потребу в розвитку енергозберігаючих технологій у міському будівництві. Теплоізоляційні матеріали є одним із основних механізмів енергозбереження в міському господарстві. З огляду на це актуальним є застосування екологічно чистих, легких, негорючих будівельних матеріалів з інноваційними характеристиками, надзвичайно економічних і ефективних. Важливо, що виробництво будівельних матеріалів з вищепереліченими характеристиками можливо в Україні з наявною великою сировинною базою. Теплоізоляційні матеріали на основі гіпсу є досить поширеними за рахунок низької вартості, легкості оброблення, незначної щільності. Як правило, в будівництві дуже рідко використовуються гіпсові вироби як такі. Майже всі будівельні матеріали, виготовлені на гіпсовій основі, є гіпсобетонними. Як заповнювачі застосовують неорганічні (кварцовий пісок, керамзит, шлакова пемза) й органічні (деревна стружка, тирса, солома, очерет) матеріали. Позитивне значення введення органічних наповнювачів у тому, що вони значно покращують теплотехнічні властивості гіпсових елементів, еластичність, міцність при ударі й зламі. Однак уведення цих наповнювачів, навіть у малих дозах, збільшує водопотребу гіпсової суміші на 15-20 %, що, відповідно, подовжує процес сушіння виробів і різко знижує (на 20-50 %) міцність при стиску. Неорганічні наповнювачі зумовлюють значно кращі показники фізико-механічних властивостей гіпсобетону, але збільшують середню густину й крихкість виробів і суттєво погіршують їх теплозахисні властивості. Для покращення теплоізоляційних властивостей та збереження міцності доцільним є використання спучених заповнювачів. Одним із таких є спучений вермикуліт, який широко застосовується в будівництві [1, 2]. Після випалу спучений вермикуліт просіюється і крупна фракція застосовується для виготовлення легких бетонів. Дрібну фракцію необхідно утилізувати. Тому пошук шляхів використання відходів, які накопичуються під час виробництва спученого вермикуліту, є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Швидке твердіння гіпсу та його високі формувальні властивості дають можливість скоротити виробничий процес, підвищити оборотність форм, налагодити виготовлення збірних великорозмірних елементів будівель і знизити вартість будівництва. Маючи порівняно малу середню густину, вироби на основі гіпсу характеризуються достатньою міцністю, низькою теплопровідністю й високими звукоізоляційними властивостями; вони легко піддаються механічній обробці (пиляються, ріжуться, свердляться тощо), добре фарбуються в різні кольори. У гіпсових бетонів є ряд слабких сторін: недостатня водостійкість, схильність до об'ємної деформації, що призводить до викривлення виробів з гіпсу [3], недостатня стійкість в умовах високих температур [4], особливо при використанні органічних наповнювачів. Ці недоліки можуть бути усунуті за допомогою введення до складу

різних добавок. У статті [4] наведено експериментальне дослідження механічних, термічних і деформаційних властивостей спіненого гіпсу при дії високої температури. Чистий гіпс, звичайний спінений гіпс із різною густиною (800 кг/м^3, 650 кг/м^3), спінений гіпс зі скловолокном або зі спученим вермикулітом тестували в інтервалі температур 25-800 °С. Результати показують, що звичайний спінений гіпс низької щільності генерує менше термічних тріщин, ніж гіпс високої щільності при підвищеній температурі. Однак уведення скловолокна збільшує термічну усадку й розтріскування гіпсового композиту після плавлення скловолокна, в той час як спінений вермикуліт значно поліпшує механічну міцність, зменшує усадку й розтріскування гіпсового композиту при високій температурі.

У роботі [5] показано, що триметафосфат натрію є сучасним засобом проти повзучості для гіпсокартонних листів, який протидіє деформації гіпсу у вологому середовищі під навантаженням. Авторами [5] вивчено поверхневу взаємодію триметафосфату натрію з кристалами сульфату кальцію залежно від різних кристалографічних аспектів. Завдяки такому підходу в кінцевому підсумку вдалося виявити принцип роботи вказаної добавки як високоефективного засобу проти повзучості і вивести загальне уявлення про засоби проти повзучості. Ці висновки можуть допомогти в пошуку та оцінці нових речовин з точки зору їх принципу роботи як агентів проти повзучості. Через велике осідання й низьку одноденну міцність будівельного гіпсу його використання для самовирівнювального будівельного розчину обмежена. У роботі [6] гіпс модифікується додаванням сульфоалюмінатного цементу й трьох типів подрібнених гранульованих доменних шлаків звичайної дисперсності (середній розмір частинок 11,3 мкм), ультратонкої (середній розмір частинок 3,67 мкм) й ультрадисперсної (середній розмір частинок 2,65 мкм) ступенів подрібнення. Було з’ясовано, що із зменшенням розміру частинок ступінь гідратації збільшується, мікроструктура стає щільнішою, а одноденна міцність підвищується.

Авторами [7] вивчалася структура, поведінка й властивості гіпсових розчинів з різними типами дрібних заповнювачів. Дослідження методом скануючої електронної мікроскопії показало, що наявність частинок заповнювачів істотно впливає на форму й розмір кристалів гіпсу в міжфазній перехідній зоні. Пористість гіпсової матриці в розчинах більша, ніж пористість чистої гіпсової пасти, а розподіл пор за розмірами зміщується у бік пор з меншими розмірами. Форма і розмір кристалів у перехідній зоні залежить від шорсткості поверхні частинок заповнювачів. Властивості розчинів також залежать від шорсткості поверхні зерна. Оброблюваність, час тужавіння й теплопровідність зменшуються зі збільшенням шорсткості поверхні зерна, а міцність і опір водяній парі зростають. Отже, при виборі мінерального заповнювача перевагу слід віддавати заповнювачам з шорсткою поверхнею для кращого зчеплення. Найбільше відповідають цим критеріям спучений вермикуліт і спучений перліт. Крім цього, ці наповнювачі є негорючими, а на відміну від неорганічних, таких як керамзит, є більш легкими, теплоємними й дешевими у виробництві [8].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цього дослідження є визначення особливостей формування структури гіпсового в’яжучого при використанні різних фракцій неорганічного заповнювача – вермикулітового порошку. Для досягнення мети необхідно: визначити оптимальну кількість вермикулітового порошку; встановити, як ступінь подрібнення заповнювача вплине на міцність при стиску та згині зразків гіпсового каменю; дослідити мікроструктуру отриманих зразків методом скануючої електронної мікроскопії.

Основна частина дослідження

Матеріали та методи досліджень. Як сировину в роботі було використано вермикулітовий концентрат Васильківського родовища (Україна, Київська область), хімічний та мінералогічний склад якого наведено в табл. 1 [9].

Таблиця 1

Хімічний склад вермикуліту Васильківського родовища [9]

Вміст оксидів, %										
SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	MnO	Na_2O	K_2O	H_2O
32,09	1,22	8,79	11,01	1,97	9,18	7,23	0,17	0,50	5,38	6,77

Як бачимо, склад використовуваного вермикуліту містить основні компоненти, що утворюють цементний клінкер, такі як кальцію оксид CaO, кремнію оксид SiO_2, оксиди Fe_2O_3, Al_2O_3, MgO. Під час просіювання спученого вермикуліту було отримано слюдяне борошно з дрібними фракціями вермикуліту із середнім розміром частинок 0,14 мм. Частина вермикуліту була подрібнена у млині тонкого помелу до середнього розміру частинок 0,01 мм.

Як в’яжуче використовувався гіпс марки Г-10, властивості якого відповідають ДСТУ Б В.2.7-82 [10]. Для досліджень було виготовлено три серії зразків. Перша серія зразків містила гіпс і воду, друга та третя серії містили добавку наповнювача. Для другої серії використовувався тонкодисперсний вермикулітовий порошок (ТВП) з розміром частинок найбільш представницької фракції 0,14 мм, для третьої – з розміром частинок найбільш представницької фракції 0,01 мм. У всіх трьох серіях водо-гіпсове відношення було однаковим і становило 0,5. Границю міцності при згині та границю міцності при стиску визначали на зразках розміром 40×40×160 мм, виготовлених із тіста стандартної консистенції, через дві години після контакту гіпсового в'яжучого з водою згідно з ДСТУ Б В.2.7-82 [10].

Вплив розмірів частинок ТВП на структуру гіпсового каменю досліджували методом електронної мікроскопії. Для досліджень використовували скануючий електронний мікроскоп JSM-6390 (виробництво японської фірми Jeol) з електронно-зондовими приставками для локального мікроаналізу: енергодисперсійний спектрометр (EDS) і хвильовий спектрометр (WDS) (виробництво англійської фірми OXFORD INSTRUMENTS). Роздільна здатність електронного мікроскопа 3,0 нм, максимальний діаметр зразка 200 мм, автоматизація переміщення столика зразка за трьома напрямками – X, Y, Z, оптимальний нахил столика зразка до 15°.

Мікрофотографування поверхні зразка і її аналіз проводився шляхом сканування і виведення на монітор комп'ютера. У нижній частині кадрів вказується: прискорювальна напруга (15 кВ), збільшення знімка, масштабна мітка, номер кадру, номер зразка. Зображення отримували в режимі вторинних електронів.

Дослідження впливу кількості й ступеня подрібнення ТВП на міцність. Для з’ясування оптимальної кількості ТВП було визначено міцність зразків при згині із зміною кількості добавки від 0 % до 7,5 % від маси цементу (рис. 1). Результати свідчать, що оптимальною є кількість тонкодисперсного порошку близько 2 %. Ця величина була прийнята для подальших досліджень.

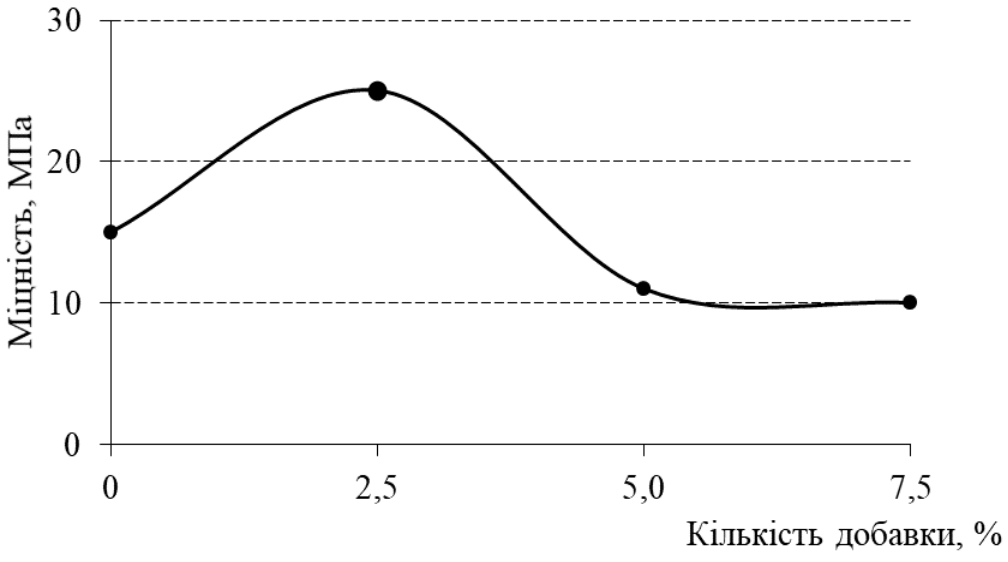


Рис. 1. Залежність міцності при згині від кількості добавки

Для оцінки впливу ступеня подрібнення ТВП для кожної серії зразків було визначено границю міцності при згині та границю міцності при стиску. Результати випробувань наведено на рис. 2.

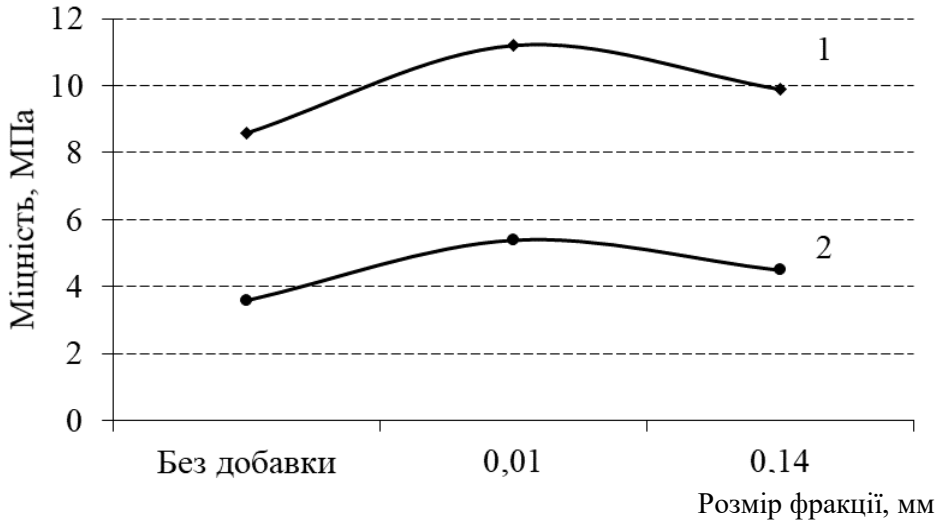


Рис. 2. Залежність міцності при стиску (*1*) і при згині (*2*) від розміру фракції наповнювача

Як видно з рис. 2, більше подрібнена фракція ТВП дозволила підвищити міцність гіпсового каменю майже на 30 % при стиску та майже на 50 % при згині. Тонкодисперсний наповнювач заповнює порожнини між кристалами дигідрату сульфату кальцію, що дає можливість збільшити кількість контактів між кристалами, а відповідно, і підвищити міцність в’яжучого. ТВП містить у своєму складі активні форми кремнезему і алюмінію, у зв'язку з чим при додаванні

його до гіпсу підвищується ступінь гідратації гідравлічного в'яжучого за рахунок утворення центрів кристалізації. Через низьку теплопровідність самих частинок вермикуліту, а також завдяки тонким прошаркам повітря між лусочками слюди, отриманий матеріал характеризується низькою теплопровідністю й високою вогнестійкістю, а також естетичністю, хімічною стійкістю, нетоксичністю, відсутністю димоутворення.

Дослідження структури гіпсових зразків з добавкою ТВП за допомогою електронної мікроскопії. На поданих фотографіях проб (рис. 3) з різними рівнями збільшення можна побачити, що структура досліджуваного гіпсового каменю має у своєму складі голчасті кристали гіпсу. Виходячи з масштабу знімків, можна визначити, що розміри голок становлять від 3 до 10 мкм, що відповідає стандартній структурі гіпсу.

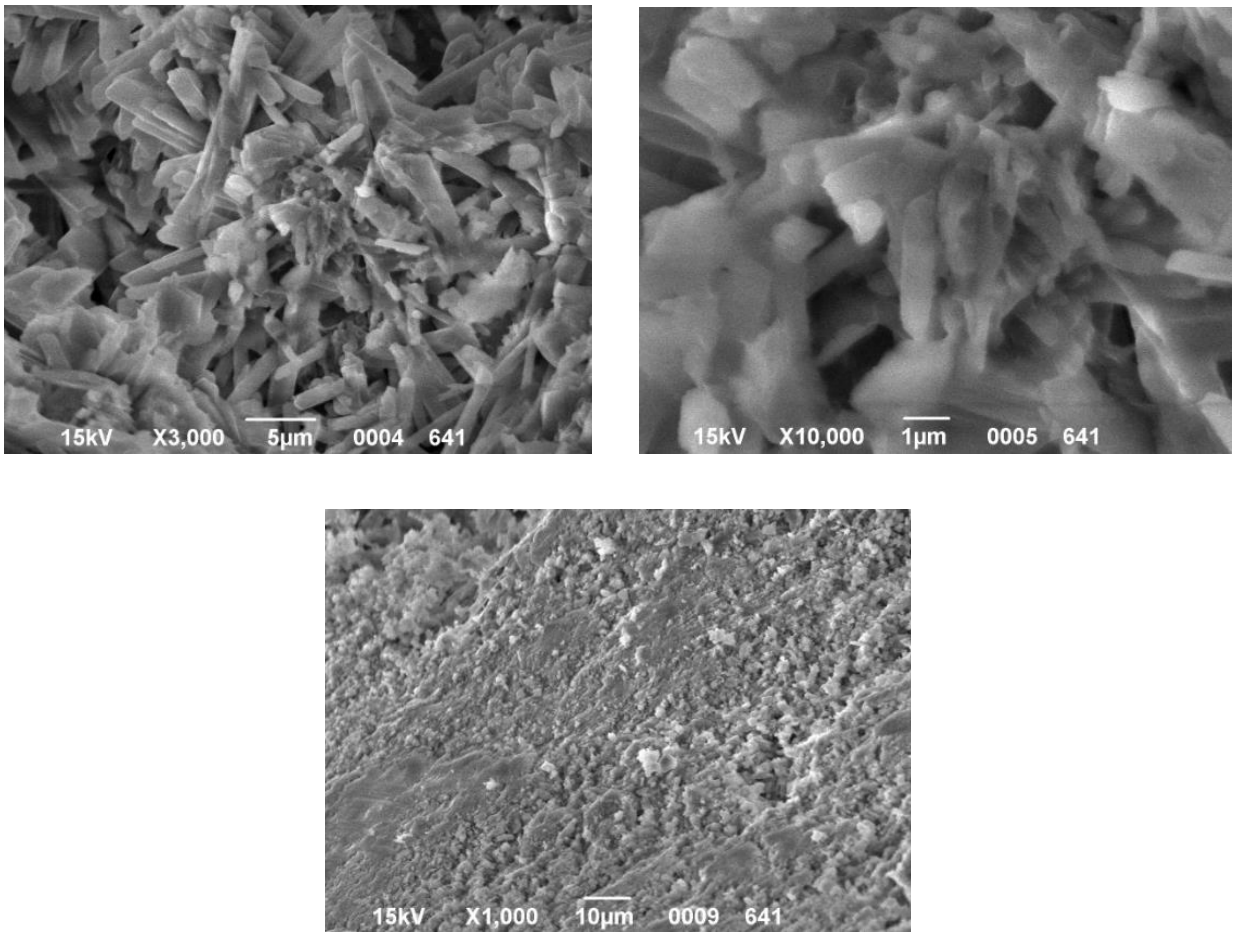


Рис. 3. Мікрофотографії гіпсу без добавки

Зразки з ТВП з розміром фракції 0,14 мм (рис. 4) при 100-250 кратному збільшенні показують неоднорідний розподіл складу на площині відколу гіпсового каменю. При більшому збільшенні спостерігається площина вермикулітової добавки (що означає первинну слюдяну будову), а також неоднорідні зв'язки вермикуліту з кристалами гіпсу (розшарування в деяких частинах).

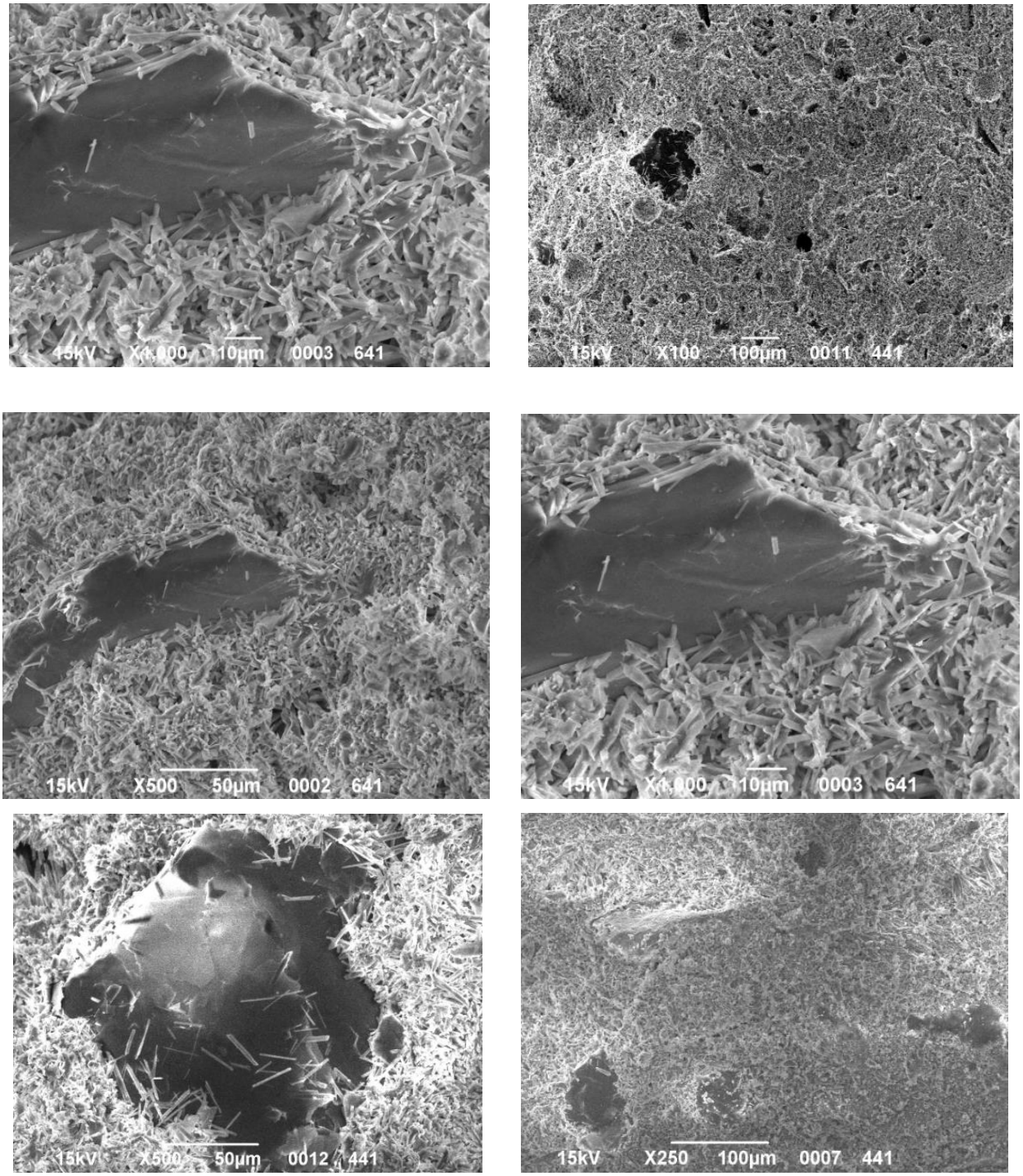


Рис. 4. Мікрофотографії гіпсових зразків з ТВП з розміром фракції 0,14 мм

На електронних фотографіях зразків з ТВП з розміром фракції 0,01 мм (рис. 5) бачимо відносно однорідний розподіл складу на площині відколу гіпсового каменю. При більшому збільшенні спостерігається розгалужена будова ТВП та її безпосередній зв'язок з кристалами гіпсу (утворюють однорідну структуру).

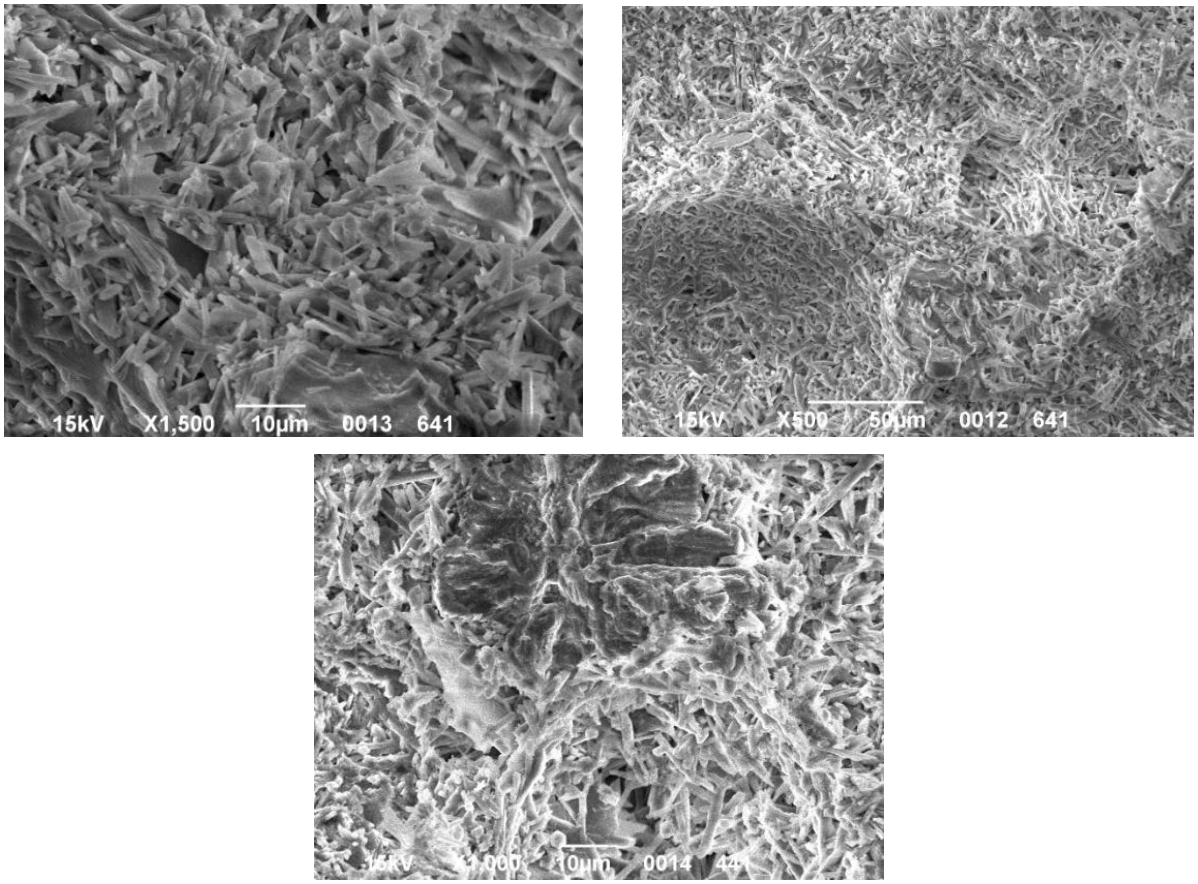


Рис. 5. Мікрофотографії гіпсових зразків з ТВП з розміром фракції 0,01 мм

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що подрібнення низьковипального вермикуліту до фракції 0,14 мм повністю не руйнує його просторових зв'язків і застосовувати його як добавку не доцільно, оскільки помітним є його неоднорідний розподіл по об’єму гіпсового каменю (рис. 6). Також можна побачити його неоднорідні зв'язки з кристалами гіпсу. ТВП, подрібнений до фракції 0,01 мм, показав однорідний розподіл по об’єму гіпсового каменю, а також безпосередній зв'язок з кристалами гіпсу, що помітно змінює структуру матеріалу. За допомогою методу електронної мікроскопії та випробувань на міцність було обрано фракцію ТВП 0,01 мм як добавку до гіпсового в’яжучого.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено можливість покращення властивостей гіпсового каменю додаванням тонкодисперсного вермикулітового порошку. Показано, що уведення ТВП з розміром найбільш представницької фракції 0,01 мм у кількості 2 % від маси цементу дало змогу збільшити міцність при згині майже на 50 % і при стиску – на 30 %. Дослідження мікроструктури зразків методом скануючої електронної мікроскопії підтвердило утворення однорідної суцільної структури із щільним розташуванням кристалів гіпсу. Використання такого порошку як наповнювача гіпсових виробів є фактором, що значно підвищує ефективність виготовлених конструкцій за рахунок більшої міцності, поліпшення теплотехнічних показників та вогнетривкості споруд. Отже, перспективним напрямком для подальшого вдосконалення гіпсобетону є використання нового модифікованого в’яжучого з різноманітними наповнюва-

чами з розміром до наночастинок включно, залучення в гідратаційні процеси новітніх активних мінеральних добавок або ефективних поверхнево-активних речовин, сучасних суперпластифікаторів та інших хімічних добавок.

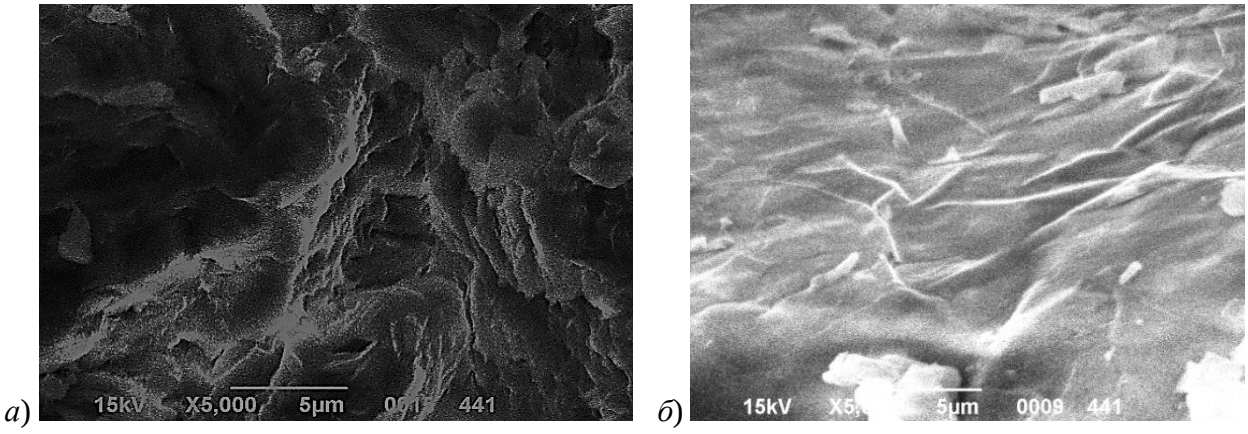


Рис. 6. Мікрофотографії гіпсового каменю з добавкою ТВП з розміром фракції 0,14 мм (*а*) і 0,01 мм (*б*)

Список використаних джерел

1. Alaa M. Rashad. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 125. P. 53–62. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019 (last access: 13.11.2019).

2. Swaminathan P., Bavitha B. Behaviour of concrete by replacing aggregates using vermiculite and insulator waste. International Journal of Recent Trends in Engineering and Research. 2019. Vol. 5 (1). P. 30–35. URL: http://dx.doi.org/10.23883/ijrter.conf.20190322.004.vgvr1 (last access: 13.11.2019).

3. Schug B., Mandel K., Schottner G., Shmeliov A., Nicolosi V., Baese R., Pietschmann B., Biebl M., Sextl G. A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster. Cement and Concrete Research. 2017. Vol. 98. P. 122–129. URL: doi:10.1016/j.cemconres.2017.04.012 (last access: 13.11.2019).

4. Du Z., She W., Zuo W., Hong J., Zhang Y., Miao C. Foamed gypsum composite with heat-resistant admixture under high temperature: Mechanical, thermal and deformation performances. Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 108. P. 103549. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103549 (last access: 13.11.2019).

5. Schug, B., Mandel, K., Schottner, G., Shmeliov, A., Nicolosi, V., Baese, R., Förthner S., Pietschmann B., Biebl M., Sextl G. Revealing the working principle of sodium trimetaphosphate as state of the art anti-creep agent in gypsum plaster. Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 107. P. 182–187. URL: doi:10.1016/j.cemconres.2018.02.025 (last access: 13.11.2019).

6. Wang Q., Jia R. A novel gypsum-based self-leveling mortar produced by phosphorus building gypsum. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. P. 11–20. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.289 (last access: 13.11.2019).

7. Krejsová J., Doleželová M., Pernicová R., Svora P., Vimmrová A. The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars. Cement and Concrete Composites. 2018. Vol. 92. P. 188–197. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.007 (last access: 13.11.2019).

8. Атинян А. О., Жигло А. А. Буханова Е. С. Энергосбережение при использовании теплоизоляционных стеновых материалов на основе гипсовых изделий. *Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві*. 2016. Вип. 5. С. 345–350.

9. Атинян А. О., Буханова К. С., Трикоз Л. В., Камчатна С. М., Пустовойтова О. М. Вплив попередньої обробки на температуру випалу вермикуліту. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2019. Вип. 183. Р. 106–114. URL: https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169875 (дата: 13.11.2019).

10. ДСТУ Б В.2.7-82:2010 Будівельні матеріали. В'яжучі гіпсові. Технічні умови. Чинний від 2011-03-01. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 29 с.

Атинян Армен Овікович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.
Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: armen.atynyan@kname.edu.ua.
Буханова Катерина Сергіївна, аспірант Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-10. E-mail: kateryna.bukhanova@kname.edu.ua.
Трикоз Людмила Вікторівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net. ORCID 0000-0002-8531-7546.
Камчатна Світлана Миколіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою Українського державного університету залізничного транспорту.
Тел. (057)730-10-69. E-mail: kamchatnayasn@gmail.com. ORCID 0000-0001-5711-4146.

Atynian Armen, PhD (Tech.), Associate Professor, Construction Technology and Building Materials Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy. Tel. (057) 707-31-10. E-mail: armen.atynyan@kname.edu.ua.
Bukhanova Kateryna, Postgraduate Student, O.M.Beketov National University of Urban Economy. Tel. (057) 707-31-10. E-mail: kateryna.bukhanova@kname.edu.ua.
Trykoz Liudmyla, D. Sc. (Tech.), Professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.
Kamchatnaya Svitlana, PhD (Tech.), Associate Professor, Location and Design of Railroad, Geodesy and Land Management Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68.
E-mail: kamchatnayasn@gmail.com.

Статтю прийнято 02.12.2019 р.

УДК 624.011

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ З'ЄДНАНЬ НА ВКЛЕЄНИХ СТЕРЖНЯХ У CLT ПАНЕЛЯХ

Кандидати техн. наук А. М. Бідаков, О. М. Пустовойтова, аспіранти Є. А. Распопов, Б. О. Страшко

NUMERICAL ANALYSIS OF JOINTS STRENGTH WITH GLUED-IN STEEL RODS BARS IN CLT PANELS

PhD (Tech.) A. Bidakov, PhD (Tech.) O. Pustovoitova, postgraduate student I. Raspopov, postgraduate student B. Strashko

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206085

Аналіз результатів міцності з'єднань на вклеєних стержнях на висмикування, які встановлені у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі, показав нові результати, які важко було передбачити з урахуванням значної практики використання вклеєних стержнів у

цільній та клеєній деревині. Оскільки ПКД панелі являють собою складну багатошарову структуру з дощок зі взаємно перпендикулярним їх розташуванням у суміжних шарах, то виникли нові граничні умови для стержнів, коли вони можуть бути розташованими на межі повздовжньої та поперечної дощок. Для оцінки достовірності отриманих експериментальних даних [1] виконано аналітичні дослідження у програмному комплексі Ansys для всіх можливих місць розташування стержнів у поперечному перерізі ПКД панелі, що можуть впливати на величини міцності, з урахуванням пружної моделі анізотропії деревини.

Ключові слова: *вклеєні сталеві стержні, збірні панелі, міцність на висмикування, поперечна клеєна деревина, ПКД, CLT, з'єднання, скінченні елементи, розрахунок, Ansys.*

New types of wood-based building materials, one of which is CLT, require an accurate assessment of the strength of various types of joints. Connections of CLT panels on glued-in steel rods have great interest in connection with the development of prefabricated modular buildings with high factory accuracy of mating joints parts. Glued-in steel rods are very effective type of rigid and semi-rigid joints in GLT elements of different constructions and allow produce structural elements with high level of prefabrication for fast and reliable installation of timber buildings. Positive experience of using glued-in steel rods during large period in timber constructions in Eastern Europe praxis seems effective in joints of cross laminated timber (CLT) panels.

The results of the strength of the glued-in rods by pull-pull tests, which were installed in the cross section of the CLT panel, showed new results that were difficult to predict by taking into account practice of using glued-in steel rods in solid and glued laminated timber. Cross laminated timber panels are a complex multilayer structure of boards with mutually perpendicular to their location in adjacent layers create new boundary conditions for the rods, when they can be located at the boundary of the longitudinal and transverse boards. In order to evaluate the reliability of the obtained experimental data were performed analytical studies in the Ansys software for all possible locations of rods in the cross section of the CLT panel, which may affect the strength values, taking into account elastic anisotropy of wood. Analysis of the glued-in rods strength by pulling, depending position in the cross-section, is the same as described in paper of prof. H. J. Blass (2007) where the positions of axially loaded self-tapping screws were varied.

Keywords: *glued-in steel rods, prefabricated panels, shear strength, cross laminated timber, CLT, connections, finite element modeling, calculation, Ansys software.*

Вступ. Швидке та стабільне зростання використання деревини як будівельного матеріалу спостерігається на житлових та офісних будівлях (рис. 1), що складаються з ПКД або CLT панелей різних товщин. Завдяки перехресній структурі шарів дощок ПКД панелі, з'єднання їх поперечних перерізів є новою складною задачею, яка потребує врахування неоднорідної структури дощок різних товщин та наявність технологічних особливостей у вигляді щілин між дошками і компенсаційних пропилів. Оскільки ПКД панель є як стіновим, так і елементом перекриття багатоповерхових будівель, то при розробці вузлів з'єднань необхідно враховувати тип з'єднувальних панелей. У європейських країнах найбільш розповсюдженими є з'єднання на гвинтах, через незначну трудомісткість у порівнянні з вклеєними стержнями, які мають велику популярність у пострадянських країнах і є більш вигідним конструктивним рішенням, ніж використання гвинтів. Для впровадження системи вклеєних стержнів для з'єднання ПКД панелей запропоновано універсальне з'єднання на вклеєних стержнях, показане на рис. 1, б, для якого були виконані дослідження стержнів на висмикування (рис. 1, в) у п'яти різних

характерних точках поперечного перерізу (рис. 1, г). Досліджені точки розташування стержня можуть впливати на величину міцності, що було досліджено на 75 зразках для трьох діаметрів вклеєних стержнів з однаковою глибиною вклеювання стержня.

а) б) в) г)

Рис. 1. Багатоповерхова будівля з ПКД панелей та вузол на вклеєних стержнях і схема виконаних досліджень: а – будівля з ПКД панелей; б – вузол на вклеєних стержнях; в – схема випробувань; г – досліджені точки вклейки стержнів

Моделювання та розрахунок напружень і деформацій експериментально досліджених зразків з ПКД або CLT виконувались у програмному комплексі ANSYS. При моделюванні зразків дотримувалися всі геометричні параметри та структура ПКД панелі з її технологічними особливостями, а саме склеювання бокових граней дощок та їх взаємно перпендикулярне розташування у суміжних шарах дощок. Відповідно пружні характеристики дощок задавалися з урахуванням напряму волокон, що спостерігається у результатах розрахунків напружень і деформацій. Пружні характеристики деревини зразків з ПКД панелей були прийняті аналогічно до досліджень B. Azinovic, E. Serrano [2] та дисертаційної роботи C. Sandhaas [5] для деревини хвойних порід, а саме сосни: модуль пружності вздовж волокон E_1=1100 МПа, модуль пружності поперек волокон E_2=370 МПа, E_3=370 МПа, модуль зсуву G_1=G_2=690 МПа та G_2=50 МПа, коефіцієнти Пуассона ν_1=0,4, ν_2=0,4 та ν_3=0,45. Пружні характеристики клею також були запозичені з низки робіт і мали такі значення: E=7000 МПа, G=2600 МПа, ν=0,25. Пружні характеристики сталі приймалися за сертифікатом, значення яких були підтверджені при перевірних випробуваннях шпильок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз показників міцності з’єднання на вклеєних стержнях на висмикування у цільній деревині [1], ЛВЛ брусі та клеєній деревині досить детально виконаний, і лише протягом останніх двох років з’єднання на вклеєних стержнях почали досліджуватись у ПКД панелях, які є новим будівельним матеріалом для будівництва багатоповерхових житлових будівель. На сьогоднішній день відомі дослідження вклеєних стержнів у ПКД панелях у дипломній роботі M. Andersen та M. Hoier [9], а також у публікаціях B. Azinovic [2, 10, 11]. Питання, розглянуті у цих публікація, не вирішують питання впливу місця розташування стержня у поперечному перерізі ПКД панелі на величину несучої здатності з’єднання.

Визначення мети та завдання дослідження. Отримання кількісних та якісних величин розподілу напружень і деформацій у ПКД панелях при висмикуванні вклеєних стержнів, що встановлені у різні характерні точки поперечного перерізу панелі. Для досягнення поставленої мети виконано аналітичні розрахункові моделі з використанням об'ємних скінченних елементів та використано пружні характеристики деревини виходячи з анізотропії матеріалу, а саме розглядається транстропна пружна модель деревини.

Основна частина дослідження. Чисельний аналіз виконувався для всіх 5 запропонованих і досліджених місць розташування вклеювання стержня у поперечному перерізі ПКД панелі. Дані, отримані в результаті розрахунку, залежать від низки таких параметрів, як розмір сітки і вид її розбиття, тип скінченного елемента і т. д. Також важливим аспектом є набір пружних характеристик матеріалів, що входять до складу конструкції, а саме їх відповідність реальності даної конструкції. Схеми трьох з п'яти моделей зразків та схему розбиття сітки об'ємних скінченних елементів показано на рис. 2. При створенні моделей та виконанні розрахунків враховувались досліди та методики, сформульовані закордонними колегами [3, 4] при дослідженні різних факторів, що впливають на величини міцності з'єднань на вклеєних стержнях. Також при створенні аналітичної розрахункової моделі з об'ємних скінченних елементів узято до уваги працю E. Serrano [8, 9] та дипломну роботу [6].

У розрахунковій моделі балки використовувався восьмивузловий просторовий анізотропний скінченний елемент SOLID 64. Розмір сітки генерувався не автоматично, а із заданими параметрами. Для розрахунку були прийняті скінченні елементи у вигляді паралелепіпедів зі сторонами 4×2×2 см. У зоні вклеювання стержнів, на ділянці 30×30 мм, виконувалось згущення сітки за радіальними напрямами до центру стержня (рис. 2, г).

Величина деформації при руйнуванні з'єднання на вклеєних стержнях у різних матеріалах на основі деревини складає до 2 мм і залежить від такого ряду факторів, як діаметр стержня, глибина вклейки та товщина клейового шару. На рис. 3 показані ізополя деформацій при рівні навантаження 10 кН (рис. 2, д) для деяких схем вклейки стержнів у поперечний переріз ПКД панелі. Оскільки руйнування з'єднань на вклеєних стержнях реалізується при сколюванні деревини вздовж стержня і має крихкий характер, що небажано, то можливо його уникати шляхом поперечних підсилень вклеєними стержнями або гвинтами. Руйнування металевого стержня не допустиме, тому несуча здатність з'єднання має бути меншою, ніж міцність металевого стержня на розтяг. Деформативність усіх розглянутих стержнів при випробуваннях відрізнялась на усьому інтервалі навантаження до руйнування і складала не більше ніж 10-15 %. Аналогічні дані отримано при аналітичних розрахунках.

Для складання технічних рекомендацій щодо проектування вузлових з'єднань на вклеєних стержнях у поперечному перерізі ПКД панелі при навантаженні вздовж осі стержня розглядалися додаткові ситуації локації стержнів, порушуючи вимоги мінімальних відстаней між осями стержнів та від осі стержня до бічних граней, які визначені для цього типу з'єднання у клеєній та цільній деревині. Як правило, мінімальні відстані є кратними діаметрам вклеєних стержнів або діаметрам отворів у деревині та складають від 2 до 5 діаметрів залежно від властивостей матеріалу на основі деревини (цільна деревини, клеєна деревина, ЛВЛ брус). На рис. 4 показано випадок близького розташування стержня до бічної грані ПКД панелі та напруження, які виникають у такому випадку.

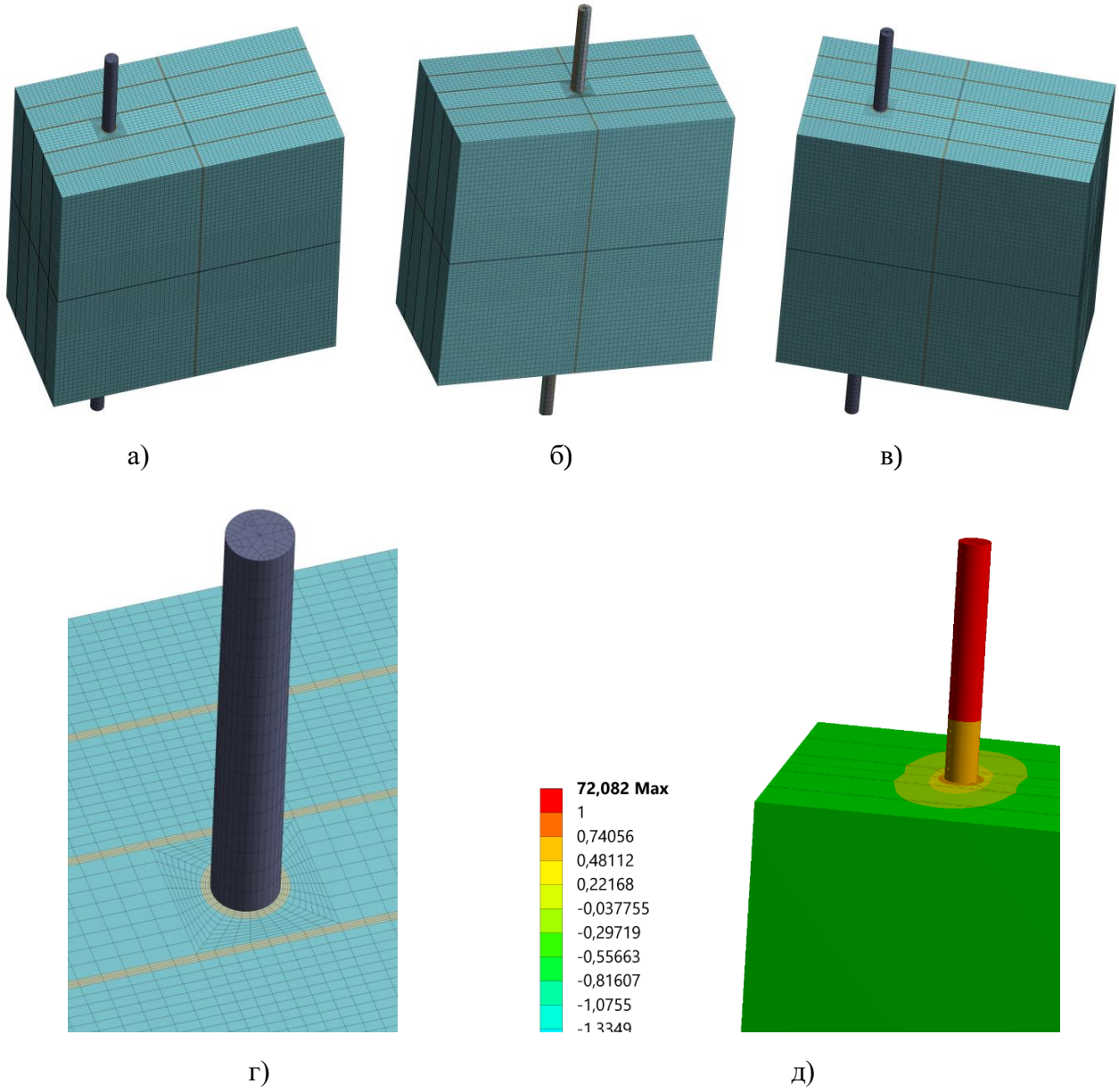


Рис. 2. Схеми моделей зразків з різними місцями розташування вклеєних стержнів та схема розбиття сітки об’ємних скінченних елементів навколо стержня:
а – схема 1 – вздовж волокон в одній дошці;
б – схема 3 – на межі двох паралельних дощок;
в – схема 4 – на межі паралельної і перпендикулярної дошки;
г – схема розбиття сітки біля стержня; д – деформація стержня за схемою 1

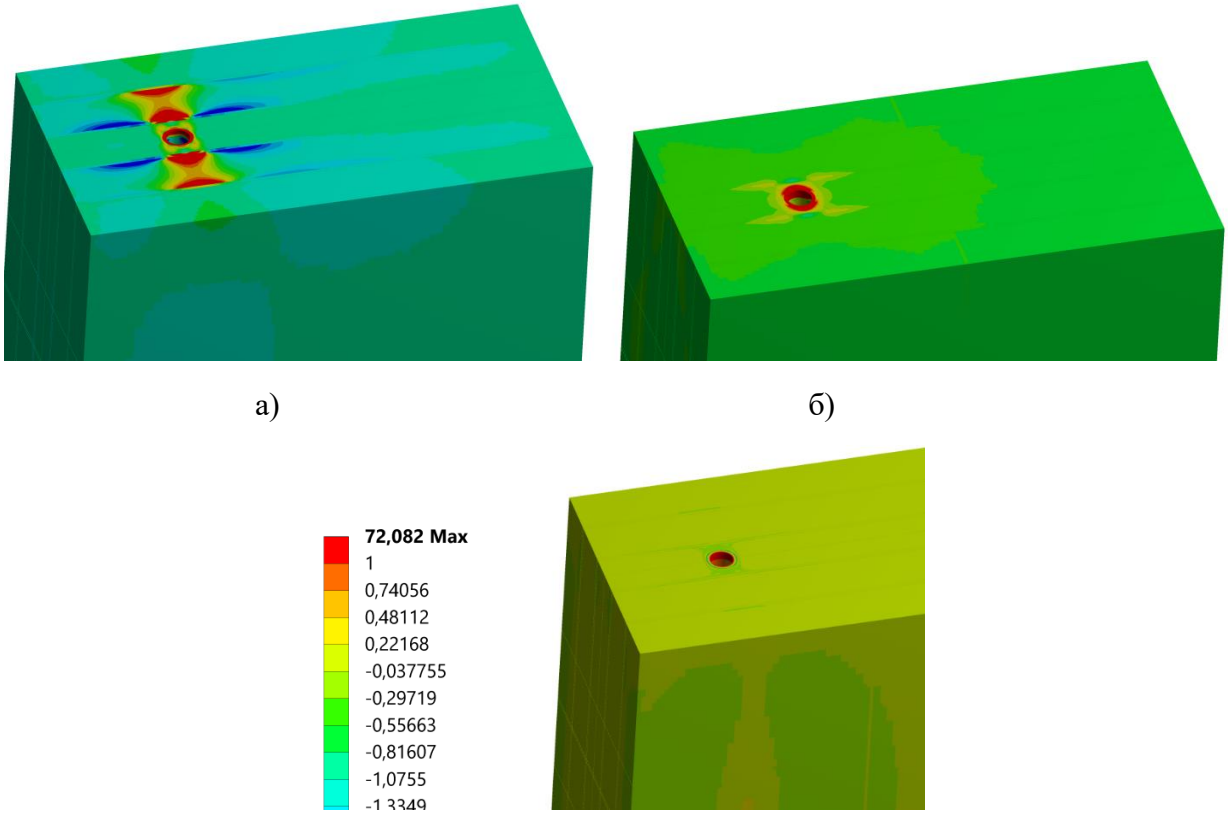


Рис. 3. Характер розподілу нормальних напружень для зразка з розташуванням вклеєного стержня за схемою 1:
а – нормальні напруження по осі X; б – нормальні напруження по осі Y; в – нормальні напруження по осі Z

Аналіз розподілу напружень для стержнів, установлених у крайні дошки, є важливим питанням, оскільки розподіл напружень у поперечному перерізі ПКД панелі значно залежить від напряму дощок, в які вклеєний стержень, та товщини дощок суміжних поперечних шарів. Виконані дослідження вказують на те, що небажано виконувати вклеювання стержнів у крайні дошки, навіть при встановленні групи вклеєних стержнів, що також потребує додаткових комплексних варіативних експериментальних досліджень для формулювання конструктивних вимог щодо компонування вузлів на вклеєних стержнях у ПКД панелях.

Висновки. На основі експериментальних досліджень міцності вклеєних стержнів у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі [1] встановлено зміну міцності з'єднань на вклеєних стержнях залежно від діаметра металевого стержня та його місця розташування у поперечному перерізі, якому характерно чергування взаємно поперечних шарів дощок. Різниця між результатами, отриманими при випробуваннях натурних моделей зразків ПКД панелей з вклеєними стержнями, і результатами, отриманими в програмному комплексі ANSYS, не перевищують 13 %, що показує високу збіжність даних для дерев'яних конструкцій і підтверджує правильність обраної розрахункової моделі. Така висока збіжність між експериментальними та аналітичними розрахунковими даними дає можливість

використовувати розрахункові комплекси для оцінки несучої здатності та деформативності вклеєних стержнів.

Для впровадження вклеєних стержнів у вузлових з'єднаннях ПКД панелей необхідно виконання досліджень міцності групи вклеєних стержнів і відповідно розробка рекомендацій про мінімальні відстані між стержнями і від стержнів до граней поперечного перерізу ПКД.

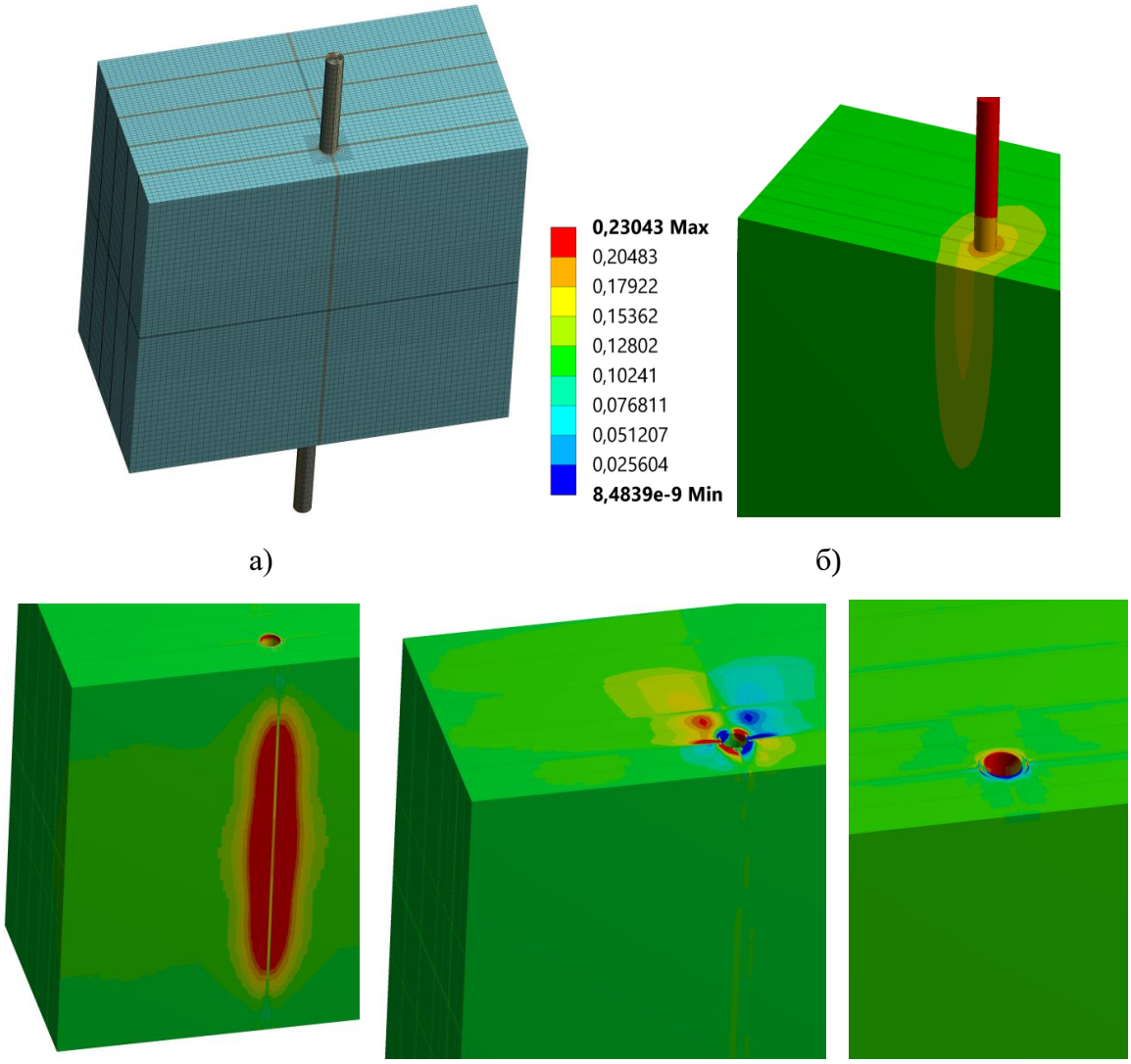


Рис. 4. Розподіл напружень і деформацій для стержня, розташованого близько до бічної грані:
а – геометрична модель; б – розподіл деформацій; в – нормальні напруження по осі Z; г – дотичні напруження у площині XY; д – дотичні напруження у площині YZ

Список використаних джерел

1. Bidakov A., Raspopov I., Strashko B. Withdrawal resistance of glued-in steel rods by pull-pull tests in CLT. Proceedings of the 1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions. Kharkiv. Kharkiv, 2018. P. 87-97.

2. Azinović B. Glued-in rods in CLT". Short Term Scientific Mission (STSM) Report. COST Action FP1402: Basis of Structural Timber Design – from research to standards, 2018. 40 p.

3. Stepinac M., Bidakov A., Jockwer R., Rajcic V. Review and evaluation of design approaches for glued-in rods in East and West Europe. World Conference on Timber Engineering, August 20-23, 2018, Seoul, Republic of Korea.

4. Stepinac, M., Hunger, F., Tomasi, R., Serrano, E., Rajcic, V. & van de Kuilen, J., 2013. Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards, Vancouver: International Council for Research and Innovation in Building and Construction.

5. Sandhaas, C. Mechanical behavior of timber joints with slotted-in steel plates. Dissertation, University of Technology Delft, The Netherlands, 2012.

6. Feldt P., Thelin A. Gluer-in rods in timber structures. Finite element analyses of adhesive failure. Master's thesis in structural engineering. Department of architectural and civil engineering, Charmels university of technology, Gothenburg, Sweden, 2018.

7. Serrano E. Adhesive joints in timber engineering – modelling and testing of fracture properties. Doctoral Thesis, Department of Mechanics and Materials, Structural Mechanics, Lund University, Sweden, 2000. 193 p.

8. Serrano E (2001) Glued-in rods for timber structuresa 3D model and finite element parameter studies. Int J Adhes Adhes 21(2):115–127.

9. M. Andersen, M. Høier, Glued-in Rods in Cross Laminated Timber, Master's Thesis, Aarhus University, 2016.

10. B. Azinovic´, E. Serrano, M. Kramar, T. Pazlar, Experimental investigation of the axial strength of glued-in rods in cross laminated timber, Mater. Struct. 51 (2018), URL: https://doi.org/10.1617/s11527-018-1268-y.

11. Azinovic´ B., Danielson H., Serrano E., Kramar M. Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies. Construction and building materials, Volume 212-Jul 10, 2019.

Бідаков Андрій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07.
E-mail: bidakov@kname.edu.ua.
Пустовойтова Оксана Михайлівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07.
E-mail: oksana_pustov@ukr.net.
Распопов Евген Анатолійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07. E-mail: raspopovkm@gmail.com.
Страшко Богдан Олександрович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-07.
E-mail: bogdanstrashko@outlook.com.

Bidakov Andrii, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: bidakov@kname.edu.ua.
Pustovoitova Oksana, PhD (Tech). Associate Professor, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: oksana_pustov@ukr.net.
Raspopov Ievgenii, Postgraduate Student, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: raspopovkm@gmail.com.
Bogdan Strashko, Postgraduate Student, Department of Building Construction, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057)707-31-07. E-mail: bogdanstrashko@outlook.com.

Статтю прийнято 02.12.2019 р.

УДК 629.423.2:681.518.54

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ДИСКРЕТНИМИ СТОХАСТИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ

Канд. техн. наук С. В. Михалків, інж. В. І. Бульба

THE FORECASTING OF THE TECHNICAL STATE OF THE TRACTION GEARBOXES OF ELECTRIC TRAINS WITH DISCRETE STOCHASTIC MODELS

PhD (Tech.) S. Mykhalkiv, eng. V. Bulba

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206182

У статті здійснено прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів дискретними стохастичними моделями. На кожному ТО-3 реєструвалися вібраційні реалізації попередньо відібраних чотирнадцяти тягових редукторів і розраховувалася фрактальна розмірність покриття. Для прогнозування технічного стану обиралася ARIMA-модель. Незважаючи на високу складність, відсутність автоматичного процесу підрахунку та необхідність здійснення декількох ітераційних процедур, підраховане найменше значення точності прогнозування ARIMA- моделлю становить 91,4 %.

Ключові слова: *ARIMA- модель, електропоїзд, прогнозування, точність, тяговий редуктор.*

The article deals with the forecasting of the technical state of the traction gearboxes of electric trains with discrete stochastic models. During every 3rd level maintenance, the vibration signals of the previously selected fourteen traction gearboxes were recorded, and the box counting dimension was estimated.

For the forecasting of the technical state, among the broadcast deterministic methods of exponential smoothing and trend analysis, the most effective ARIMA model was selected. This model in certain applications has higher precision than GRNN and BPNN neural networks. The implementation of the ARIMA model requires accomplishment of the identification, evaluation, fitting and practical application stages for the forecasting model. The identification was performed due to the one-step differentiation with a further stationarity check according to the autocorrelation function and partial autocorrelation function.

The evaluation of the ARIMA model with the different orders of the autoregression component and moving average component was done. For the model fitting, the Akaike's information criterion and Bayes information criterion were calculated, and the autoregression component of the ARIMA model having the minimum values of these criteria was selected. The forecasting of the fitted ARIMA models with an 80 % confidence interval was done for the period since the 71st 3rd level maintenance up to the next 2nd level current repair. After disassembling 14 traction gearboxes during the 2nd level current repair, the insufficient amount of a lubricant in the first gearbox, wear of a roller bearing of the front cover in the second gearbox, a crack of a bearing ring of the front cover in the third gearbox, a tooth break of a gear in the fourth traction gearbox, destruction of a bearing in the fifth gearbox and a tooth crack of its gear were detected. It was established that the

ARIMA model is difficult to upgrade for the evaluation of other data, which requires the implementation of measures for a resimulation. Despite high complexity, the absence of the automatic process for the calculation and the necessity of performing several iterative procedures, the calculated minimum value precision of the ARIMA model forecasting is equal to 91.4 %

Keywords: *accuracy, ARIMA model, electric train, forecasting, traction gearbox.*

Вступ. Концепція обслуговування обладнання в різних галузях промисловості за технічним станом була запропонована давно. Її метою є подолання обмежень, які накладає планово-запобіжна система обслуговування та ремонту завдяки впровадженню стратегій прогнозування для мінімізації ризиків та скорочення коштів [9].

Вібраційні сигнали тягових редукторів електропоїздів містять важливу інформацію про технічний стан зубчастого зачеплення та підшипників кочення. Тому в технології діагностування є важливою фіксація тих змін у сигналах, які вказують на наближення відмови.

Отже, запорукою успішного переходу до системи ТО й ПР тягового (ТРС) та моторвагонного рухомого складу (МВРС) за технічним станом є реалізація точних методів прогнозування, які здатні визначати час настання відмови й надавати змогу вчасно вживати відповідних превентивних заходів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на безліч методів прогнозування, багато дослідників зосередилися на застосуванні та поглибленні теорії часових рядів у таких додатках, як фінанси, виробництво, управління. У часових рядах є одна змінна та її попередні значення й завжди наявне припущення про випадковий вплив чинників з навколишнього середовища на змінну, величина якої має прогнозуватись, тому висновок про майбутню поведінку часових рядів робиться з їх попередніх значень [17].

У прогнозуванні набули поширення детерміновані методи експоненційного згладжування, аналізу тренду й стохастичні методи. Модель регресії упроваджує задану форму для опису відношення між залежними й незалежними змінними часового ряду, що не завжди дозволяє вважати цю модель адекватною для прогнозування відповідних величин [14]. Також модель регресії володіє стандартним припущенням про статистичну незалежність величини помилки, хоча здебільшого реальні часові ряди залежать або мають автокореляцію між своїми складовими [8]. Натомість сучасні методи машинного навчання позбавлені потреби здійснювати припущення щодо визначення залежності в моделі та автоматично визначають згадану залежність упродовж процесу навчання даних [11, 15]. Нейронні мережі більше призначені для роботи з часовими рядами зі складною та нелінійною структурою. Іншим підходом до моделювання часових рядів є використання методології Бокса–Дженкінса або інтегрованої дискретної стохастичної моделі авторегресії і ковзного середнього (ARIMA) [2], яка оперує вхідними змінними й позбавляє дослідника потреби вибору вагомих змінних або форми залежності між ними та використовується у низці додатків [4, 6, 10, 12, 15, 17]. Зокрема середньоквадратична похибка оптимальної ARIMA-моделі для прогнозування споживання електроенергії становить 1,6 % у порівнянні з 3,0 % для експоненційного згладжування та 3,1 % для моделі регресії [3]. Незважаючи на те, що в роботі [11] для прогнозування цін на кам’яновугільний кокс ARIMA-модель продемонструвала вищу середньоквадратичну помилку порівняно із нейронною мережею узагальненої регресії (GRNN), це не завадило їй здійснити більш точний прогноз із меншою середньою абсолютною помилкою та абсолютною відсотковою помилкою, а в прогнозуванні зміни

швидкості вітру ARIMA-модель володіла майже вдвічі меншою середньою абсолютною відсотковою помилкою, ніж нейронна мережа зі зворотним поширенням помилки (BPNN) [15]. Також ARIMA-модель мала меншу середню абсолютну відсоткову помилку в порівнянні з непараметричною моделлю Гаусівських процесів (GP) у прогнозуванні споживання електричної енергії [12]. Додатково слід зважати на значно вищу тривалість обчислення нейронними мережами та їх складну архітектуру [6].

Зважаючи на брак чітких або емпіричних правил із вибору найкращої моделі для прогнозування технічного стану обладнання ТРС та МВРС, доцільно обирати ту модель, яка володіє найменшими помилками за результатами моделювання, де дослідник має шукати компроміс між точністю прогнозування та складністю методу, якщо точність однакова, то переваги надаються простішому методові [6].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є конструювання дискретних стохастичних моделей за методологією Бокса–Дженкінса для прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів.

Для досягнення сформульованої мети потрібно розв’язати такі завдання:

— здійснити ідентифікацію ARIMA-моделей, реалізувавши низку заходів;

— оцінити вплив AR- та MA-складових на структурну ідентифікацію ARIMA- моделей;

— визначити ефективність ARIMA-моделей у прогнозуванні різних видів несправностей тягових редукторів електропоїздів.

Основна частина дослідження. Послідовності спостережень, які розташовані в хронологічному порядку, називаються часовими рядами. Звичною стратегією аналізу часових рядів є їх розкладання на три основні компоненти: тренд, сезонність та іррегулярні компоненти або залишки. Залишки подекуди можуть суттєво приховувати тренд і сезонність, що унеможливлює здійснення точного прогнозування. Ефективність певних методів оцінюється за здатністю прогнозування відповідного компонента, здебільшого це тренд або сезонність, а спрогнозувати залишки є значно важчим завданням [10].

ARMA-модель синтезує два різні методи моделювання часового ряду: авторегресії (AR) і ковзного середнього (MA).

AR-модель

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i Y_{t-i} + \varepsilon_t, \qquad (1)$$

де Y_t – значення ряду за часом t;

c – константа;

ε_t – залишок (білий шум) за часом t;

φ_i – коефіцієнти моделі;

p – порядок моделі.

MA-модель

$$Y_t = c + \sum_{i=1}^{q} \theta_i \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t, \qquad (2)$$

де θ_i – коефіцієнти моделі;

q – порядок моделі.

ARMA-модель

$$Y_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^{p} \varphi_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^{q} \theta_i \varepsilon_{t-i}. \qquad (3)$$

AR-модель прогнозує значення Y_t на підставі лінійної функції апроксимації обмеженого числа p минулих значень Y_t. Коли залишок є суттєвим, AR-модель утрачає чинність і потрібно залучати MA-модель, де послідовності є лінійними комбінаціями значень залишків, проте опис послідовностей лише MA-моделлю

здійснюють зрідка. ARMA-модель вважає несуттєвим залишок ε_t у порівнянні з послідовностями Y_t для оцінювання майбутніх значень Y_t. ARMA-моделі широко використовують лінійні часові ряди для визначення тренду й прогнозування майбутніх значень, однак здебільшого природа зміни величин у виробничих процесах є складною та нестаціонарною [17]. Отже, слід вживати відповідні методи перетворення для набуття початковими даними рис стаціонарності. Найчастіше залучається метод диференціювання різного порядку, з подальшим припасуванням ARIMA-моделі. Прогнозовані майбутні значення отримують зі стаціонарної часової форми з подальшим уживанням низки перетворень для повернення їх до початкової форми.

Наступним удосконаленням ARMA-моделі є ARIMA-модель, яка здатна описувати часові ряди з ознаками нестаціонарності.

$$\left(1-\sum_{i=1}^{p}\varphi_i L^i\right)(1-L)^d Y_t=\left(1+\sum_{i=1}^{q}\theta_i L^i\right)\varepsilon_t+c, \qquad (4)$$

де $L=Y_{t-1}/Y_t$ – оператор зсуву (лаг);
d – порядок диференціювання.

Порядок ARIMA-моделі записується у формі (p, d, q), де p — порядок AR-складової, d — порядок диференціювання, q — порядок MA-складової.

Алгоритм побудови APIMA-моделі містить такі складові (рис. 1):

1. Ідентифікація моделі:

— потрібно встановити порядок диференціювання d (що відповідає інтегральній частині моделі), тобто досягнути стаціонарність ряду, взявши достатню кількість послідовних різниць ($Y_t = Y_t - Y_{t-1}$). Початковий крок з диференціювання може вживатися одно- або багаторазово для усунення нестаціонарності. Здебільшого d дорівнює одиниці й зрідка двом [13]. Набута стаціонарність фіксується за автокореляційною функцією (АКФ) та частковою автокореляційною функцією (ЧАКФ);

— отриманому стаціонарному ряду Y_t підібрати параметри ARMA-моделі. Зважаючи на поведінку АКФ і ЧАКФ, установити порядки p і q.

2. Оцінювання моделі.

За допомогою спеціальних чисельних процедур за відомими даними на цьому етапі оцінюються коефіцієнти $\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_p$ та $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_p$ за умови, що вже відомі p і q. Оцінка величин коефіцієнтів проводиться на основі методу найменших квадратів і принципу максимальної правдоподібності.

3. Перевірка адекватності моделі.

Інформацією для аналізу адекватності моделі слугують залишки ε_t. Згідно з припущенням про білий шум залишку ε_t перевіряється некорельованість залишків. Структурна ідентифікація оптимальної моделі в обраному класі ARIMA-моделей відбувається припасуванням із використанням інформаційних критеріїв.

Перший із критеріїв вибору оптимальної моделі — інформаційний критерій Акайкі (AIC). Згідно з ним вибирається модель, яка мінімізує значення статистики

$$AIC = \ln\hat{\sigma}^2 + (2/n)r, \qquad (5)$$

де $\hat{\sigma}^2$ – залишкова сума квадратів, поділена на кількість спостережень;
n – число залишків;

r – число параметрів моделі, що зазнали оцінювання.

Байєсовий інформаційний критерій (BIC) також рекомендує обирати ту модель, яка мінімізує вираз

$$BIC = \ln \hat{\sigma}^2 + (\ln n / n)r. \qquad (6)$$

Остаточний вибір порядків p і q для підкласу моделей проводиться на основі пошуку мінімальних значень AIC та BIC.

4. Практичне застосування моделі для прогнозування. Насамкінець, коли підраховані оптимальні параметри моделі й часовий ряд відновлений інтегруванням d разів, можна розпочинати прогнозування майбутнього значення часового ряду за виразом $Y_{t+s} = \varphi_1 Y_{t+s-1} + ... + \varphi_{p+d} Y_{t+s-p-d}$.

Рис. 1. Алгоритм побудови ARIMA-моделі

Експериментальні дослідження проводилися вибірково на чотирнадцяти тягових редукторах трьох електропоїздів серії ЕР2Т. Упродовж міжремонтного інтервалу між двома ПР-2 проводились сімдесят п’ять ТО-3 та п’ять ПР-1. На кожному ТО-3 та ПР-1 в оглядовому стійлі здійснювалася реєстрація вібраційних реалізацій чотирнадцяти тягових редукторів з боку підшипника кочення передньої кришки редуктора. Реєстрація відбувалася на шістдесяти шести ТО-3 та п’яти ПР-1 та на ПР-2 перед розбиранням. Для кожного із зареєстрованих вібраційних реалізацій розраховувалась фрактальна розмірність покриття. Прогнозування технічного стану здійснювалось на решту дев’ять ТО-3 і до ПР-2 з наступним порівнянням фактичного технічного стану після розбирання редуктора на ПР-2 із прогнозованим значенням фрактальної розмірності покриття. Із чотирнадцяти редукторів справними виявилися дев’ять, решта мали такі несправності:

1) недостатня кількість мастила в редукторі;

2) знос ролика підшипника передньої кришки редуктора;

3) тріщина кільця підшипника передньої кришки редуктора;

4) відкол зуба шестірні редуктора;

5) руйнування підшипника передньої кришки редуктора й тріщина зуба шестірні.

Побудова ARIMA-моделі для прогнозування, приміром 5-го виду несправності, розпочинається з аналізу залежності розрахованих фрактальних розмірностей покриття від кількості ТО-3 (п'ять ПР-1 рахувалося як п'ять ТО-3), на якій відслідковується стале зростання тренду залежної змінної у міру збільшення кількості ТО-3 та брак сезонної складової, ознакою якої є повторювальний характер змін (рис. 2).

Аналіз АКФ демонструє нестаціонарний характер залежності, зважаючи на повільне спадання коефіцієнтів АКФ (рис. 3).

Для набуття стаціонарності виявилася достатньою реалізація першого кроку диференціювання d=1. Ознаками набутої стаціонарності часового ряду є стрімке падіння коефіцієнтів АКФ у межі встановлених інтервалів (рис. 4, а).

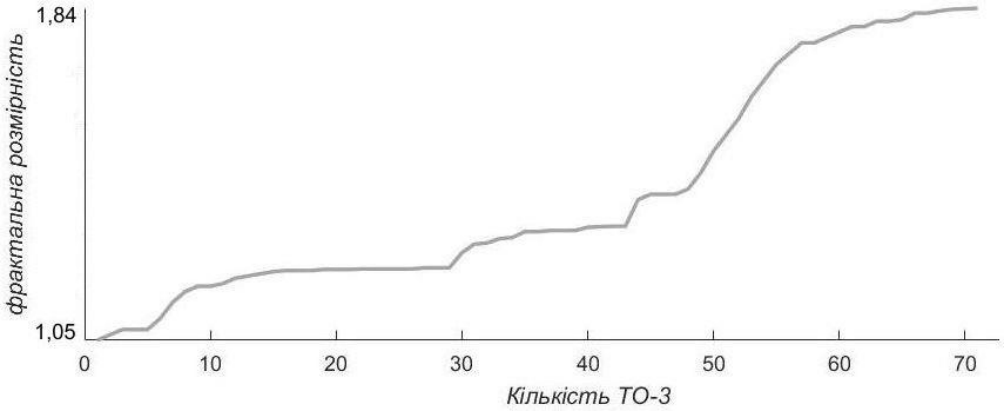


Рис. 2. Залежність фрактальної розмірності від кількості ТО-3 для 5-го виду несправності

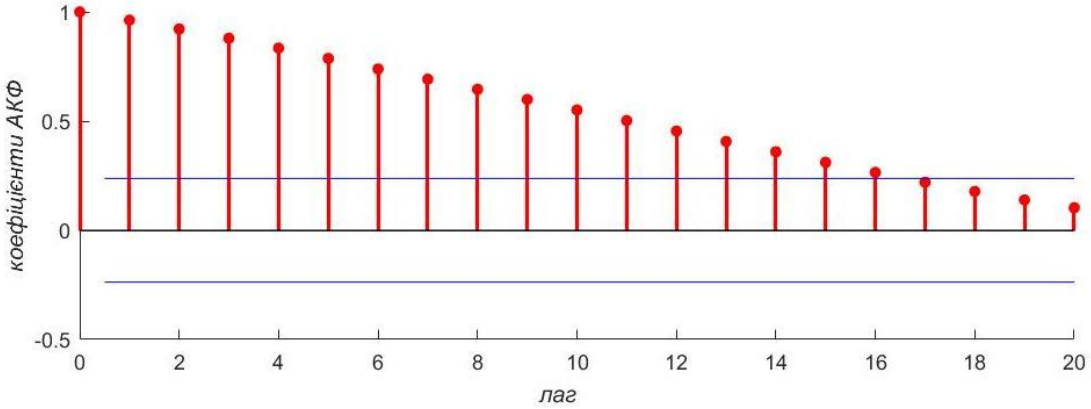
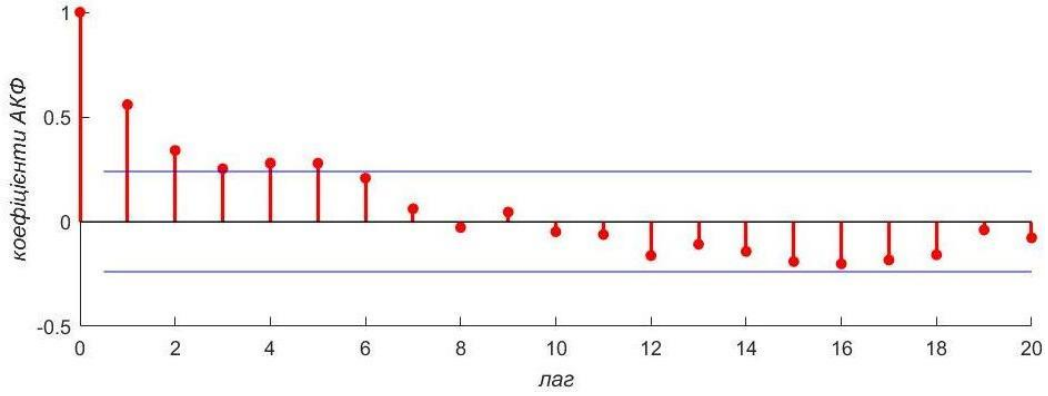
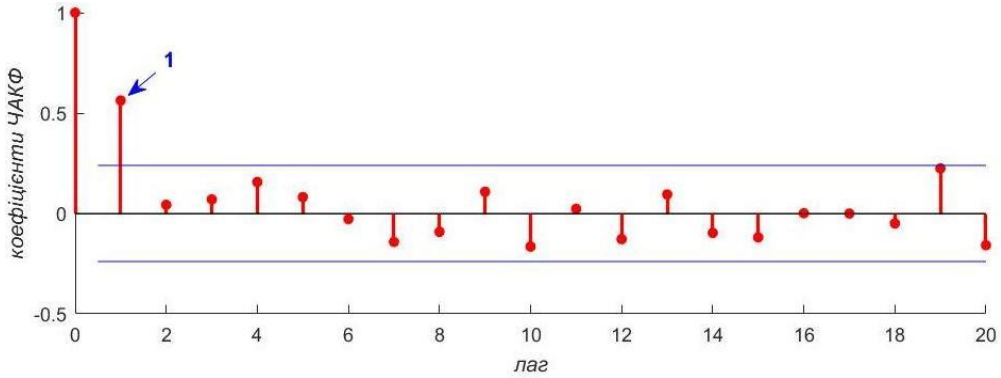


Рис. 3. АКФ часового ряду 5-го виду несправності



а)



б)

Рис. 4. АКФ та ЧАКФ часового ряду 5-го виду несправності:
а — АКФ стаціонарного часового ряду; б — ЧАКФ стаціонарного часового ряду

Підбір параметрів проводився, зважаючи на поведінку ЧАКФ, зокрема порядок АР-складової брався за номером того лагу, який передує потраплянню в межі встановлених інтервалів (рис. 4, б). Також бралися вищі порядки окремо АР- та МА-складових та їх комбінацій для ідентифікації ARIMA-моделі для 5-го виду несправності за мінімальними значеннями обчислених AIC та BIC критеріїв (табл. 1).

Структурна ідентифікація ARIMA-моделей решти видів несправностей тягових редукторів та одного справного редуктора наведена в табл. 2.

Припасування отриманих оптимальних ARIMA-моделей наведено на рис. 5.

Таблиця 1

Визначення параметрів ARIMA-моделі для 5-го виду несправності

	Параметри ARIMA-моделі								
	(1,1,0)	*(2,1,0)*	*(3,1,0)*	*(0,1,1)*	*(0,1,2)*	*(0,1,3)*	*(1,1,1)*	*(2,1,2)*	*(3,1,3)*
AIC	-777,37	-775,48	-773,86	-748,63	-750,45	-754,56	-775,58	-746,45	-771,08
BIC	-770,67	-766,60	-762,84	-741,89	-741,46	-743,31	-766,65	-733,13	-753,44

Таблиця 2

Структурна ідентифікація оптимальних ARIMA-моделей

	Припасовані ARIMA-моделі для різних несправностей тягових редукторів					
	справний (5,1,0)	*1 вид (2,1,0)*	*2 вид (3,1,0)*	*3 вид (4,1,0)*	*4 вид (2,1,0)*	*5 вид (1,1,0)*
AIC	-823,88	-826,84	-713,63	-751,89	-708,93	-777,37
BIC	-808,65	-817,96	-702,61	-738,75	-700,06	-770,67

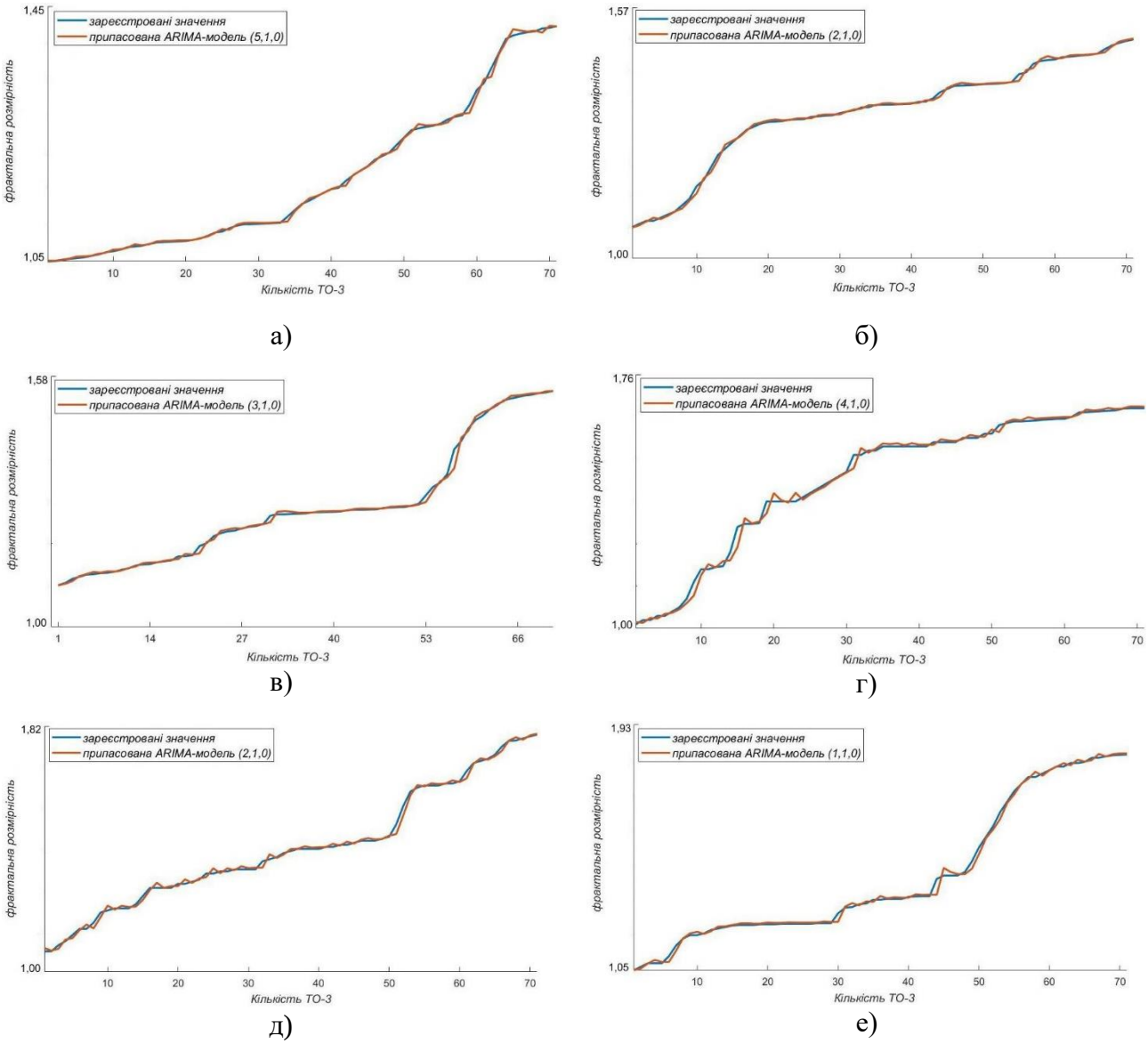


Рис. 5. Припасування ARIMA-моделей до розрахованих залежностей фрактальних розмірностей від кількості ТО-3 тягових редукторів:
а — справний редуктор; б — 1-й вид несправності; в — 2-й вид несправності; г — 3-й вид несправності; д — 4-й вид несправності; е — 5-й вид несправності

Сконструйованими оптимальними ARIMA-моделями (табл. 3) здійснене прогнозування технічного стану тягових редукторів (рис. 6) із 80 % довірчими інтервалами [5]

$$Y_{t+s|t} \pm 1,28c\hat{\sigma}_h, \quad (7)$$

де $\hat{\sigma}_h$ – середньоквадратичне відхилення s-кроку розподілу прогнозу.

Довший період прогнозування призводить до стрімкого розширення довірчих інтервалів, що не властиво для моделей із сильно вираженим трендом, які не застосовують диференціювання.

Таблиця 3

Оптимальні ARIMA- моделі для прогнозування технічного стану тягових редукторів

Технічний стан	Розраховані коефіцієнти ARIMA- моделей
справний	$(1-0,727\cdot L+0,008\cdot L^2-0,028\cdot L^3-0,176\cdot L^4+0,225\cdot L^5)(1-L)Y_t = \varepsilon_t+0,00026$
1-й вид не-справності	$(1-0,397\cdot L-0,374\cdot L^2)(1-L)Y_t=\varepsilon_t+0,00019$
2-й вид не-справності	$(1-0,329\cdot L-0,2\cdot L^2-0,2\cdot L^3)(1-L)Y_t=\varepsilon_t+0,00035$
3-й вид не-справності	$(1-0,264\cdot L+0,014\cdot L^2+0,143\cdot L^3-0,32\cdot L^4)(1-L)Y_t=\varepsilon_t+0,00041$
4-й вид не-справноті	$(1-0,627\cdot L+0,228\cdot L^2)(1-L)Y_t=\varepsilon_t+0,00089$
5-й вид не-справності	$(1-0,565\cdot L)(1-L)Y_t=\varepsilon_t+0,00038$

Підрахунок точності прогнозування здійснюється за виразом [7]

$$\text{Точність} = \left(1-\frac{|t_a-t_p|}{t_a}\right)\cdot 100\,\%, \quad (8)$$

де $t_a = 81$ – фактичне значення кількості ТО-3 (або ПР-2, на якому відбулося розбирання тягових редукторів);

t_p – прогнозоване значення кількості ТО-3, на якому підтвердиться справний стан, або відбудеться відмова (див. рис. 6).

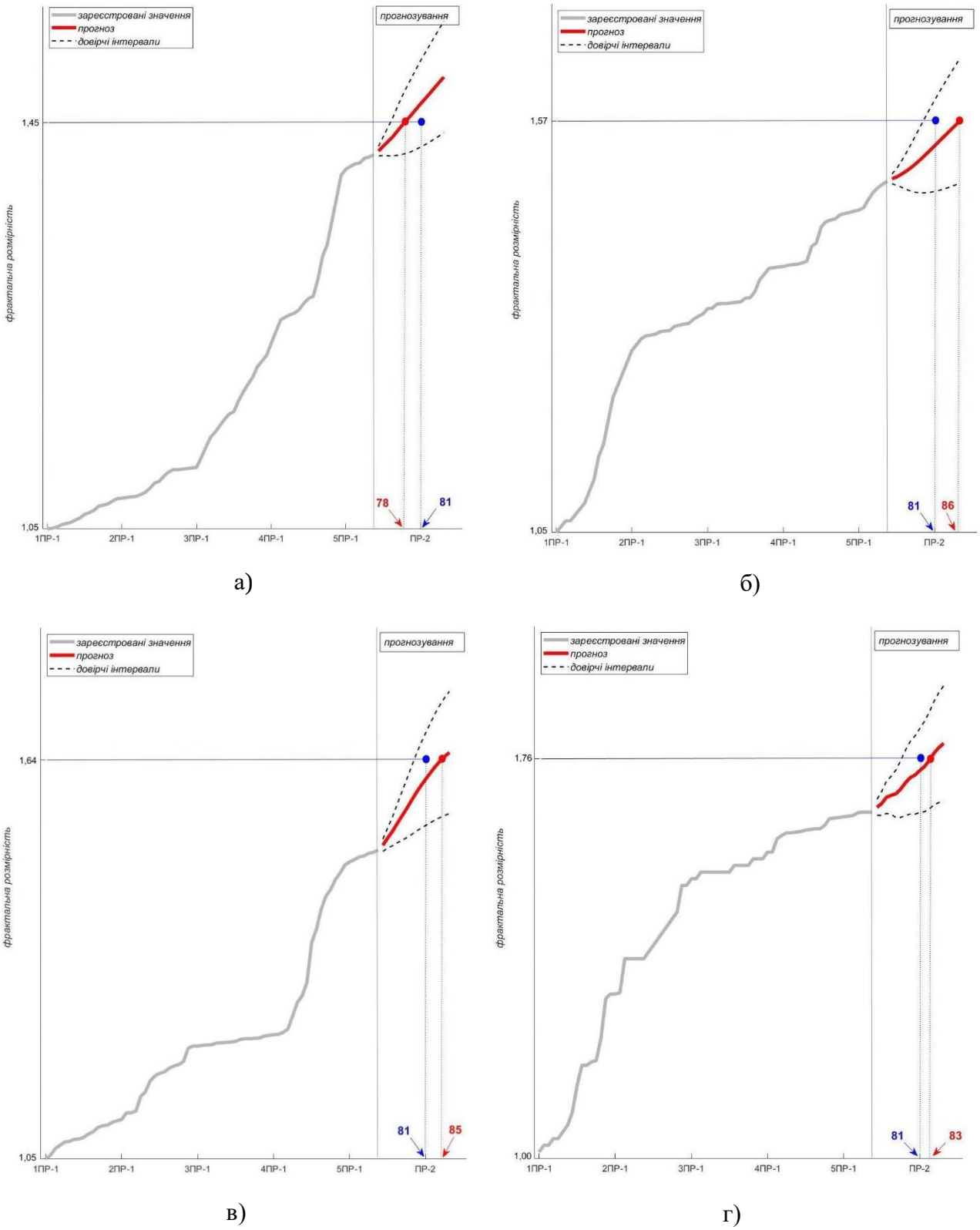
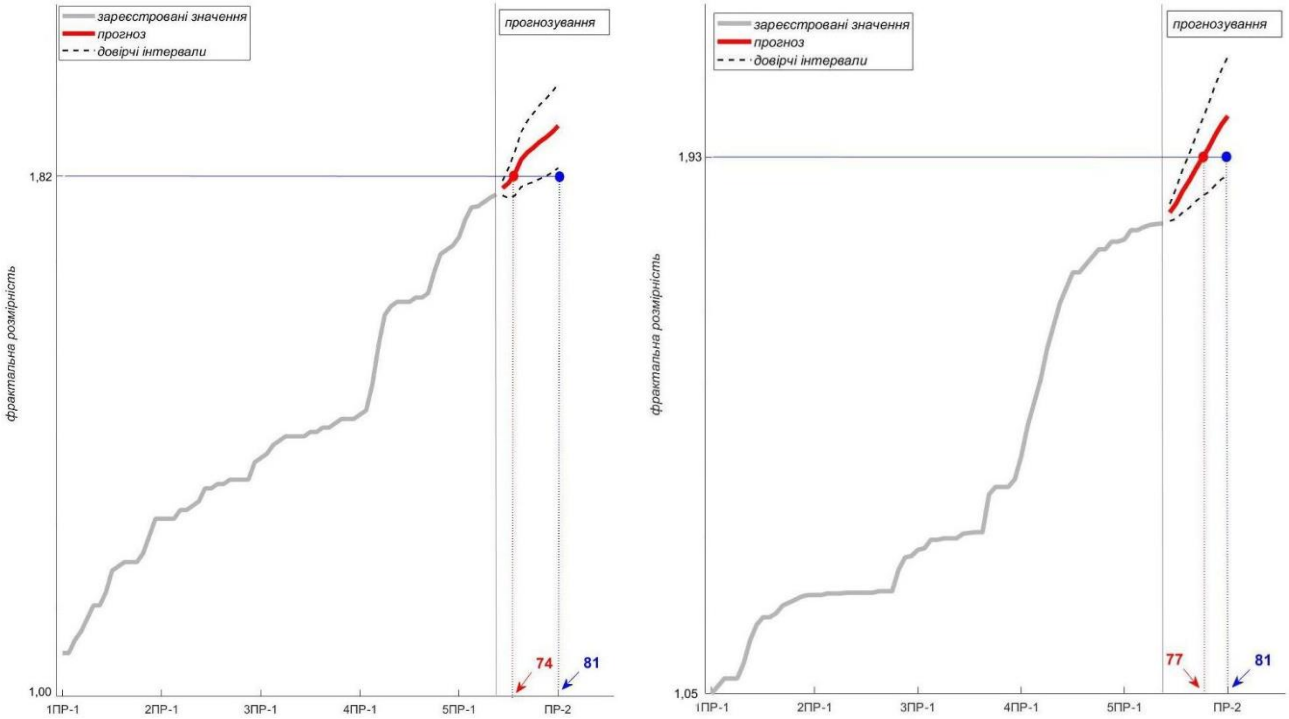


Рис. 6. Прогнозування ARIMA-моделями технічного стану тягових редукторів до ПР-2: а – справний редуктор; б – 1-й вид несправності; в – 2-й вид несправності; г – 3-й вид несправності (початок)



д) е)

Рис. 6. Прогнозування ARIMA -моделями технічного стану тягових редукторів до ПР-2: д – 4-й вид несправності; е – 5-й вид несправності (закінчення)

Результати розрахунків за виразом (8) зводяться до табл. 4.

Таблиця 4

Точність прогнозування припасованими ARIMA- моделями

	Види несправнсотей тягових редукторів					
	справний	*1-й вид*	*2-й вид*	*3-й вид*	*4-й вид*	*5-й вид*
Точність, %	96,3	93,8	95,1	97,5	91,4	95,1

Отже, методологія Бокса–Дженкінса дозволяє будувати точні ARIMA-моделі для прогнозування технічного стану тягових редукторів електропоїздів.

Висновки. Правильність обрання порядку AR-складової за номером того лагу, який передує потраплянню в межі установлених інтервалів на ЧАКФ, підтвердилась за найнижчими значеннями критеріїв AIC та BIC. Однак для оцінки певних процесів можна визначати прийнятну ARIMA-модель, вдаючись до надмірного припасування й нехтуючи порядковим номером лагу ЧАКФ та відмовляючись від отриманої попередньої моделі на користь моделі зі значно вищим порядком AR-складової, яка демонструє прийнятну точність.

Гнучкість методології Бокса–Дженкінса дозволяє обирати найбільш

прийнятний підклас моделей з-поміж AR- та MA-складової. Для всіх 6 видів технічного стану досліджуваних тягових редукторів найкраще припасування продемонструвала лише AR-складова, тимчасом MA-складова як наодинці, так і в поєднанні з AR-складовою реалізовувала вищі значення критеріїв AIC та BIC, що відповідає низькому впливу наявних залишків. Здійснено структурну ідентифікацію ARIMA-моделей для відповідних технічних станів.

Успішна реалізація дискретних стохастичних APIMA-моделей потребує лише наявності дискретних величин, які накопичуються протягом відповідних експериментів. Такі недоліки APIMA-моделей, як вища складність, потреба в здійсненні декількох ітераційних процедур та неможливість реалізації автоматичного процесу, не впливають на точність прогнозування, найменше значення якої за результатами досліджень сягало 91,4 %.

Список використаних джерел

1. Зубенко Д. Ю. Повышение надежности тяговых передач рельсового электротранспорта: монография. Харьков, 2015. 122 с.

2. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time series analysis. Forecasting and control. 5th edition. New Jersey: Wiley & Sons, 2016. P. 712.

3. Chavez S. G., Bernat J. X., Coalla H. L. Forecasting of energy production and consumption in Asturias (northern Spain). *Energy*. 1999. Vol. 24(3). P. 183-198. URL: https://doi.org/ 10.1016/S0360-5442(98)00099-1.

4. Fan R. Y. C., Ng S. T., Wong J. M. W. Reliability of the Box-Jenkins model for forecasting construction demand covering times of economic austerity. *Construction Management and Economics*. 2010. Vol. 28(3). P. 241-254. URL: https:// doi.org/10.1080/01446190903369899.

5. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 2nd edition: OTexts, 2018. P. 382.

6. Kandananond K. Forecasting electricity demand in Thailand with an Artificial Neural Network approach. *Energies*. 2011. Vol. 4(8). P. 1246-1257. URL: https://doi.org/10.3390/en4081246.

7. Kosasih B. Y., Caesarendra W., Tieu K., Widodo A., Moodie C. A. S., Tieu A. K. Degradation trend estimation and prognosis of large low speed slewing bearing lifetime. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 493. P. 343-348. URL: https://doi.org/10.4028/ www.scientific.net/AMM.493.343.

8. Lu Y., AbouRizk S. M. Automated Box-Jenkins forecasting modelling. *Automation in Construction*. 2009. Vol. 18(5). P. 547-558. URL: https://doi.org/ 10.1016/j.autcon.2008.11.007.

9. Lu Y., Li Q., Liang S. Y. Physics-based intelligent prognosis for rolling bearing with fault feature extraction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. P. 611-620. URL: https://doi.org/ 10.1007/s00170-018-1959-0.

10. Martinez-Alvarez F., Troncoso A., Asencio-Cortes G., Riquelme J. C. A survey on data mining techniques applied to electricity-related time series forecasting. *Energies*. 2015. Vol. 8(11). P. 13162-13193. URL: https://doi.org/ 10.3390/en81112361.

11. Matyjaszek M., Fernandez P. R., Krzemien A., Wodarski K., Valverfe G. F. Forecasting coking coal prices by means of ARIMA models and neural networks, considering the transgenic time series theory. *Resources Policy*. 2019. Vol. 61. P. 283-292. URL: https://doi.org/ 10.1016/j.resourpol.2019.02.017.

12. Meer van der D. W., Shepero M., Svensson A., Widen J., Munkhammar J. Probabilistic forecasting of electricity consumption, photovoltaic power generation and net demand of an

individual building using Gaussian Procesesses. *Applied Energy*. 2018. Vol. 213. P. 195-207. URL: https://doi.org/10.1016/j.apenergy. 2017.12.104.

13. Mills T. C., Markellos R. N. The economic modelling of financial time series. 3rd edition. New York: Cambridge University Press, 2008. 456 p.

14. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to linear regression analysis. 5th edition. New Jersey: Wiley & Sons, 2012. 672 p.

15. Prema V., Rao K. U. Time series decomposition model for accurate wind speed forecast. *Renewables: Wind, Water, and Solar*. 2015. Vol. 2(1). 18. URL: https:// doi.org/10.1186/s40807-015-0018-9.

16. Wei N., Li C., Peng X., Zeng F., Lu X. Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. Vol. 181. 106187. URL: https://doi.org/10.1016/ j.petrol.2019.106187.

17. Zhao J., Xu L., Liu L. Equipment fault forecasting based on ARMA model. International Conference on Mechatronics and Automation (Harbin, 05-08 Aug. 2007). Harbin, 2007. P. 3514-3518. URL: https://doi.org/10.1109/ICMA.2007. 4304129.

Михалків Сергій Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID: 0000-0002-0425-6295.
Тел.(057) 730-20-16. E-mail: svm_m@kart.edu.ua.
Бульба Владислав Ігоревич, інженер, регіональна філія «Південна залізниця». E-mail: bulbass@i.ua.

Mykhalkiv Serhii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID: 0000-0002-0425-6295. Tel.(057) 730-20-16.
E-mail: svm_m@kart.edu.ua.
Bulba Vladyslav, Engineer of the Regional Branch “Southern Railway”. E-mail: bulbass@i.ua.

Статтю прийнято 07.11.2019 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 629.454.22

КОМПОНУВАЛЬНІ СХЕМИ ПЕРСПЕКТИВНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ КУПЕЙНИХ СПАЛЬНИХ ВАГОНІВ КЛАСУ 1-СВ

Канд. техн. наук С. В. Войтків

LAYOUT SCHEMES OF PERSPECTIVE PASSENGER COUPE SLEEPING WAGONS OF A CLASS 1-SW

PhD (Tech.) S. Voytkiv

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206190

Запропоновано напрями підвищення рівнів комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів за рахунок збільшення ширини вагонів і застосування нових компонувальних схем на основі розміщення пасажирських одномісних купе вздовж боковин вагонів. Розроблено компонувальні схеми перспективних пасажирських купейних спальних вагонів різного рівня комфортабельності вмістимістю 20, 14 і 10 осіб, одномісні купе яких обладнані сидінням і відповідно або умивальником, або вакуумним туалетом, або вакуумним туалетом і душовою кабіною. Наведено аналіз існуючих і пропонованих пасажирських спальних вагонів. Проведено оцінювання рівнів комфортабельності пропонованих варіантів перспективних вагонів.

Ключові слова: *пасажирський спальний вагон, компонувальна схема, рівень комфортабельності, технічний рівень.*

*The offered directions increasing levels of passenger compartment comfort sleeping wagons by increasing the width of the wagons and the use of new layout scheme based on placing single passenger compartment along the sidewalls wagons. The layout charts of perspective passenger sleeping wagon of different level of comfort are worked out. Among the offered projects of carriages is a sleeping wagon of a class 1-SW** with twenty single-seat compartments, equipped by a sleeping sofa, seat, folding table, by a flexible lamp above a table, individual lamp above a sofa, by a washstand with a box for garbage, by a mirror, hanger for a clothing, by shelves for luggage and so on. In the wagon there are two public toilets and toilet of conductors or shower general use. The wagon is equipped with two tambours - the working and non-working, office coupe, rest coupe for wagon conductors and boiler compartment. Wagon capacity is 20 passengers. The variant of sleeping wagon of a class 1-SW***, is offered fourteen single-seat compartments are accommodated in that, equipped by a sleeping sofa, seat, folding table, flexible lamp above a table, individual lamp above a sofa, mirror, hanger for a clothing, by shelves for luggage, by an individual toilet with a washstand, by a mirror with shelves and others like that. The capacity of carriage makes 14 persons. Another proposed project sleeper wagon of a class 1-SW**** characterized by even higher level of comfort. In the wagon provides ten single compartment, equipped similarly to a compartment of a class 1-SW*** and additionally an individual shower cabin. Capacity of the wagon is 10 people. Analysis performed of existing and proposed passenger*

sleeping cars and the assessment of the levels of comfort of the proposed options for promising sleeping wagons.

Keywords: *passengersleeping wagon, layoutscheme, comfortlevel, technicallevel.*

Вступ. Залізничний транспорт України є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, бо забезпечує майже 50 % річного обсягу пасажирських перевезень. Станом на 1 січня 2019 р. інвентарний парк пасажирських вагонів залізничного транспорту України налічував загалом 4220 од. різних типів – купейних, плацкартних, загальних тощо [1]. Проте в робочому стані знаходилось лише близько 2900 од. Таким чином, приблизно третина вагонів не могла бути задіяною для перевезень пасажирів. Більш того, з кожним роком катастрофічно збільшується відсоток зносу парку пасажирських вагонів. З показника у 86 % у 2016 р. він сягнув рівня 92,6 % у 2019 р.

Зрозуміло, що парк пасажирських вагонів потребує негайного і постійного оновлення. Але воно має відбуватися з урахуванням нових вимог до рівня комфортабельності вагонів, якого сьогодні потребують пасажири.

Значна частина загального обсягу пасажирських перевезень залізничним транспортом припадає на міжрегіональні та міжміські перевезення пасажирів. У сучасних умовах розвитку суспільства в європейських та інших країнах вибір пасажирами залізничного транспорту для переміщень на великі відстані залежить у першу чергу від рівня комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів і вартості проїзду в них [2-4].

Тому створення та освоєння виробництва конкурентоспроможних купейних спальних вагонів суттєво вищого рівня комфортабельності у порівнянні з тими, які виготовляються на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», та принаймні збереження вартості перевезень пасажирів у вагонах порівнянної вмістимості є важливим і дуже актуальним завданням вітчизняного вагонобудування та інших галузей промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Суттєве підвищення рівня комфортабельності перевезень пасажирів у спальних вагонах класу 1-СВ без зменшення їх вмістимості можливе за рахунок двох напрямів, пов’язаних зі збільшенням габаритних розмірів (довжини і ширини) та застосуванням інших компонувальних схем вагонів. У роботі [5] для проектування перспективних пасажирських вагонів ще у 2006 р. було запропоновано розмірні параметри по базі вагонів 19,0 м та по довжині між осями механізмів автозчеплення у діапазоні 26,4-26,8 м. Габаритні розміри поперечного перерізу вагонів для внутрішньодержавного сполучення і по мережі залізниць Білорусі та Росії регламентовано вимогами статичних габаритів 1-Т і 1-ВМ [6], згідно з якими ширина вагонів може бути не більше 3,4 м.

На даний час ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» [7] виготовляє купейні спальні вагони, які за рівнем комфортабельності можна віднести до класу 1-СВ* з рекомендованими розмірними параметрами по базі та довжині за двома компонувальними схемами з поперечним розташуванням спальних диванів і відкидних верхніх полиць, обладнаних двома тамбурами (рис. 1).

Вмістимість серійних купейних вагонів класу 1-СВ* моделей 61-778Б і 61-779А, габаритна довжина яких сягає 26,696 м, а ширина по кузову становить 3,021 м, складає відповідно 18 ос. (вони мають 9 купе вмістимістю 2 ос.) та 20 ос. (10 двомісних купе).

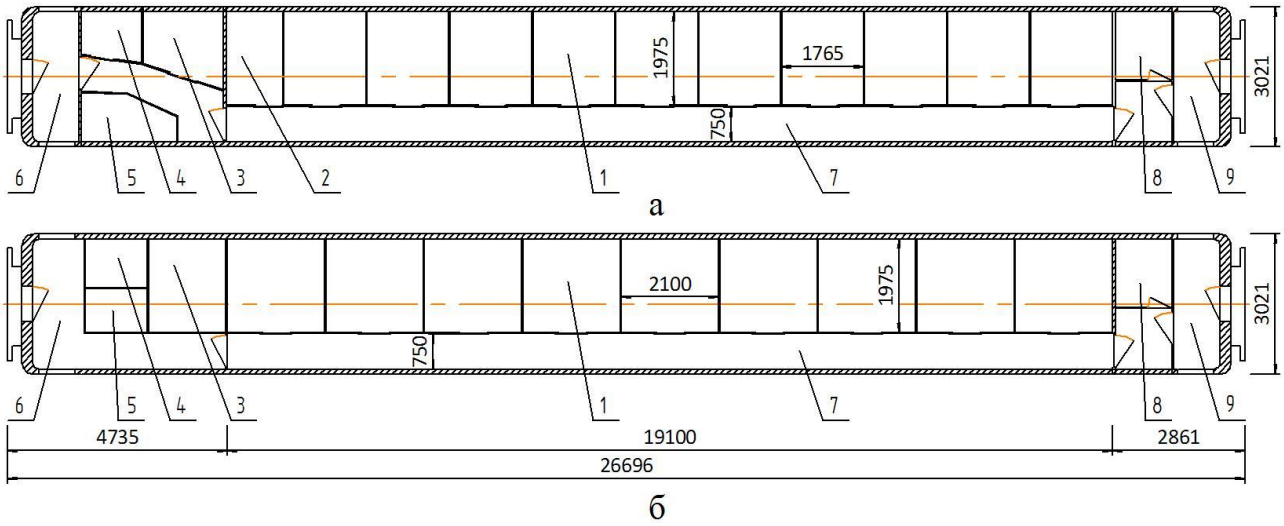


Рис. 1. Компонувальні схеми купейних вагонів класу 1-СВ*:
а – модельного ряду 61-779; б – модельного ряду 61-778;
1 – пасажирські купе; 2 – купе відпочинку провідників; 3 – службові купе;
4, 8 – туалети загального користування; 5 – котельний відсік;
6 – тамбур робочий; 7 – прохід по вагону; 9 – тамбур неробочий

Вагонобудівна компанія ТОО «Вагонобудівний завод «Тулпар», що знаходиться у Казахстані [8], виготовляє купейні вагони за дещо іншою компонувальною схемою, яка відрізняється від схеми на рис. 1, а тим, що два туалетні приміщення загального користування розташовані біля неробочого тамбура (рис. 2).

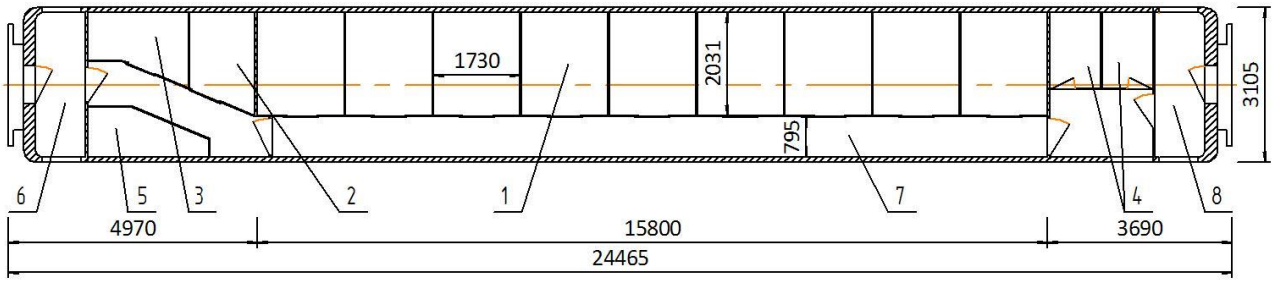


Рис. 2. Компонувальна схема купейних вагонів класу 1-СВ*:
1 – пасажирські купе; 2 – купе відпочинку провідників; 3 – службові купе;
4 – туалети загального користування; 5 – котельний відсік;
6 – тамбур робочий; 7 – прохід по вагону; 8 – тамбур неробочий

Вмістимість купейних вагонів моделі 61-907 класу 1-СВ* складає 18 ос. (9 двомісних купе).

Отже, максимальна вмістимість купейних спальних вагонів класу 1-СВ* різних моделей становить 18-20 ос. Вони налічують дев’ять або десять двомісних купе, обладнаних двома спальними диванами, відкидним столиком, вішаками для одягу, дзеркалом, індивідуальними світильниками, багажною полицею тощо.

Основна частина дослідження. Концепція створення перспективного купейного вагона класу 1-СВ підвищеної комфортабельності, або надалі класу 1-СВ**, ***полягає у розміщенні в купе лише одного пасажира*** при збереженні його загальної вмістимості 20 ос. ***за рахунок розташування купе вздовж обох боковин вагона.*** Збереження загальної вмістимості вагона передбачає і збереження або мінімальне збільшення вартості проїзду в ньому відносно вартості проїзду в купейному спальному вагоні 1-го класу моделі 61-779А виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» вмістимістю 20 ос. Крім того, купе такого вагона додатково обладнується окремим місцем для сидіння, рукомийником з ящиком для сміття, вішаком для одягу і полицею для багажу.

Пропоновану компонувальну схему перспективних купейних спальних вагонів підвищеної комфортабельності класу 1-СВ** з поздовжнім розташуванням одномісних купе подано на рис. 3.

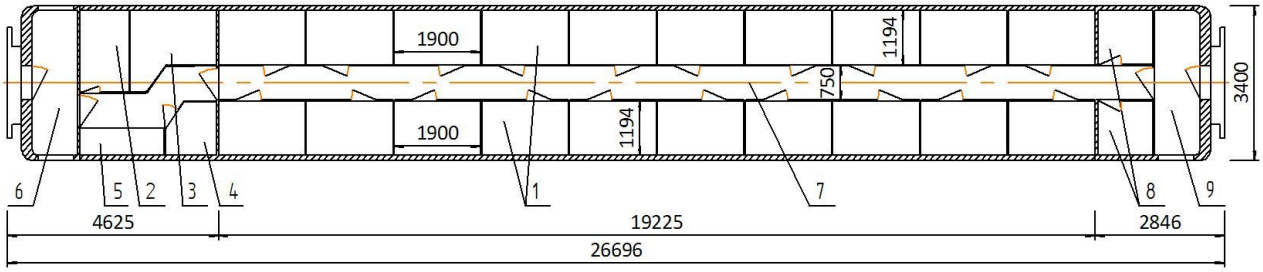


Рис. 3. Пропонована компонувальна схема купейних вагонів класу1-СВ**:
1 – пасажирські купе; 2 – купе відпочинку провідників; 3 – службове купе;
4 – туалет провідників або душ загального користування; 5 – котельний відсік;
6 – тамбур робочий; 7 – прохід по вагону; 8 – туалети загального користування;
9 – тамбур неробочий

Основною складовою пасажирського купе є спальний диван, який, власне, й визначає його розмірні параметри – довжину та ширину. Аналіз розмірних параметрів диванів і купе за різними нормативними документами викладено у табл. 1.

Ще одним важливим розміром пасажирського купейного спального вагона є ширина поздовжнього проходу, яка становить не менше 0,75 м [6] або 0,68 м [11].

Розрахункову схему одномісного пасажирського купе пропонованого спального вагона класу 1-СВ** наведено на рис. 4.

Ширина пасажирського купе пропонованого вагона класу 1-СВ** визначається з двох умов: за мінімальною шириною спального місця і відстанню від нього до перегородки купе та за внутрішньою шириною вагона і допустимою мінімальною шириною проходу по вагону за виразом

$$b_д + b_п \le B_к \le 0,5\left(B - b_{пр}\right) - s_б - s_п; \quad (1)$$

де B – ширина кузова вагона, м;

$b_{пр}$ – ширина проходу по вагону, м;

$s_б$ – товщина боковини вагона, м;

$s_п$ – товщина перегородок купе, м;

$b_д$ – ширина дивана, м;

$b_п$ – відстань від дивана до перегородки купе, м.

Таблиця 1

Розмірні параметри пасажирського купе вагона класу 1

Найменування параметра	Нормативний документ		
	ДСТУ 4049-2001 [9]	О+Р 562 [10]	СП 2.5.1198-03 [11]
Габаритні розміри купе, не менше, м: - довжина;	-	2,1	1,9
- ширина	-	1,9	-
Габаритні розміри диванів, не менше, м: - довжина;	1,9		1,84
- ширина	0,75	0,6	
Відстань між диванами, не менше, м	0,6		0,5
Відстань між диваном і перегородкою, м	-	-	≥ 0,5
Розмірні параметри дверей у просвіті, м: - висота;	≥ 2,0		≥ 1,9
- ширина	≥ 0,56	≥ 0,65	≥ 0,52

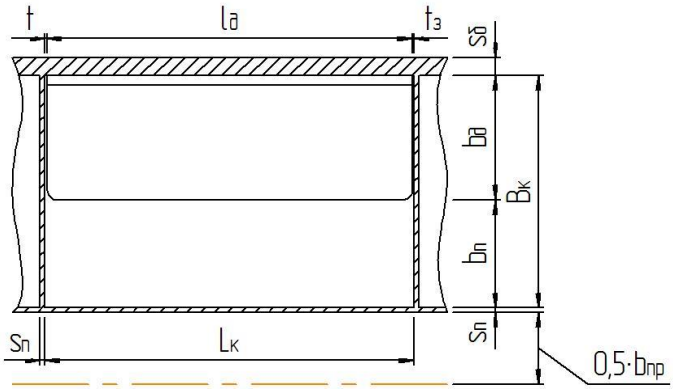


Рис. 4. Розрахункова схема розмірних параметрів пасажирського купе пропонованого вагона класу 1-СВ**

При допустимій ширині вагона B=3,40 м відповідно до вимог статичних габаритів 1-Т або 1-ВМ і прийнятих значеннях $b_{пр}$=0,75 м, $s_б$=0,095 м, $s_п$=0,025 м, $b_л$=(0,6-0,75) м і $b_п$=0,5 м отримуємо

$$(1{,}10\text{-}1{,}25)\ \text{м} \le B_к \le 1{,}194\ \text{м}.$$

Оскільки критичним розміром ширини купе є величина 1,194 м з лівої частини виразу (1), то $b_л$=1,194-0,5= 0,694 м. З урахуванням вимог [7, 8] ширину дивана можна обрати з діапазону $0{,}6\ \text{м} \le b_д \le 0{,}694\ \text{м}$.

Довжина пасажирського купе спального вагона класу 1-СВ** з поздовжнім розташуванням спального дивана визначається за виразом

$$L_к \ge l_д + 2t_з; \qquad (2)$$

де $l_д$ – регламентована довжина дивана, м;

$t_з$ – величина зазору між диваном і перегородкою, м.

За умови $l_д$=(1,84-1,9) м [6-8] і прийнятої величини $t_з$=0,01 м розрахункова довжина купе становить $L_к \geq$ (1,86-1,92) м.

Для пропонованого купейного вагона класу 1-СВ** вибрані такі розмірні параметри: довжина купе – 1,9 м, довжина і ширина дивана – відповідно 1,88 м і 0,65 м, відстань між диваном і перегородкою купе – 0,5 м.

Планування одномісного пасажирського купе перспективного конкурентоспроможного спального вагона класу 1-СВ** та його основні розмірні параметри наведено на рис. 5.

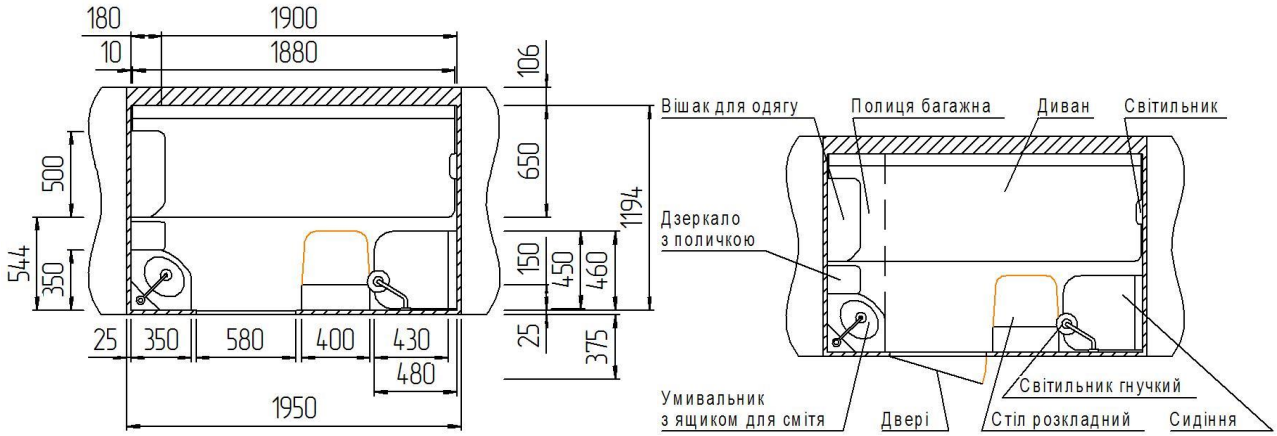


Рис. 5. Планування і розмірні параметри одномісного купе вагона класу 1-СВ**

Планування купейного спального вагона підвищеного рівня комфортабельності проекту sV-02.01 класу 1-СВ** за пропонованою компонувальною схемою подано на рис. 6.

Оцінку комфортабельності пропонованого купейного спального вагона проекту sV-02.01 класу1-СВ** у порівнянні з купейним спальним вагоном такої самої вмістимості моделі 61-779А виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» наведено у табл. 2.

Отже, пропонована компонувальна схема купейних спальних вагонів з одномісними пасажирськими купе, розташованими вздовж їх боковин, і центральним поздовжнім проходом по вагону забезпечує створення перспективних конкурентоспроможних вагонів, які за рівнем зручності користування та рівнем комфортабельності значно переважають над існуючими вагонами класу 1-СВ*.

Пропонована компонувальна схема забезпечує також створення перспективних конкурентоспроможних купейних спальних вагонів проекту sV-02.02 класу 1-СВ*** вмістимістю 14 ос., які мають 14 одномісних купе з індивідуальними приміщеннями, обладнаними вакуумним туалетом, умивальником із дзеркалом, ящиком для сміття тощо (рис. 7), та вагонів проекту sV-02.03 класу 1-СВ**** вмістимістю 10 ос., купе яких додатково обладнані індивідуальною душовою кабіною (рис. 8).

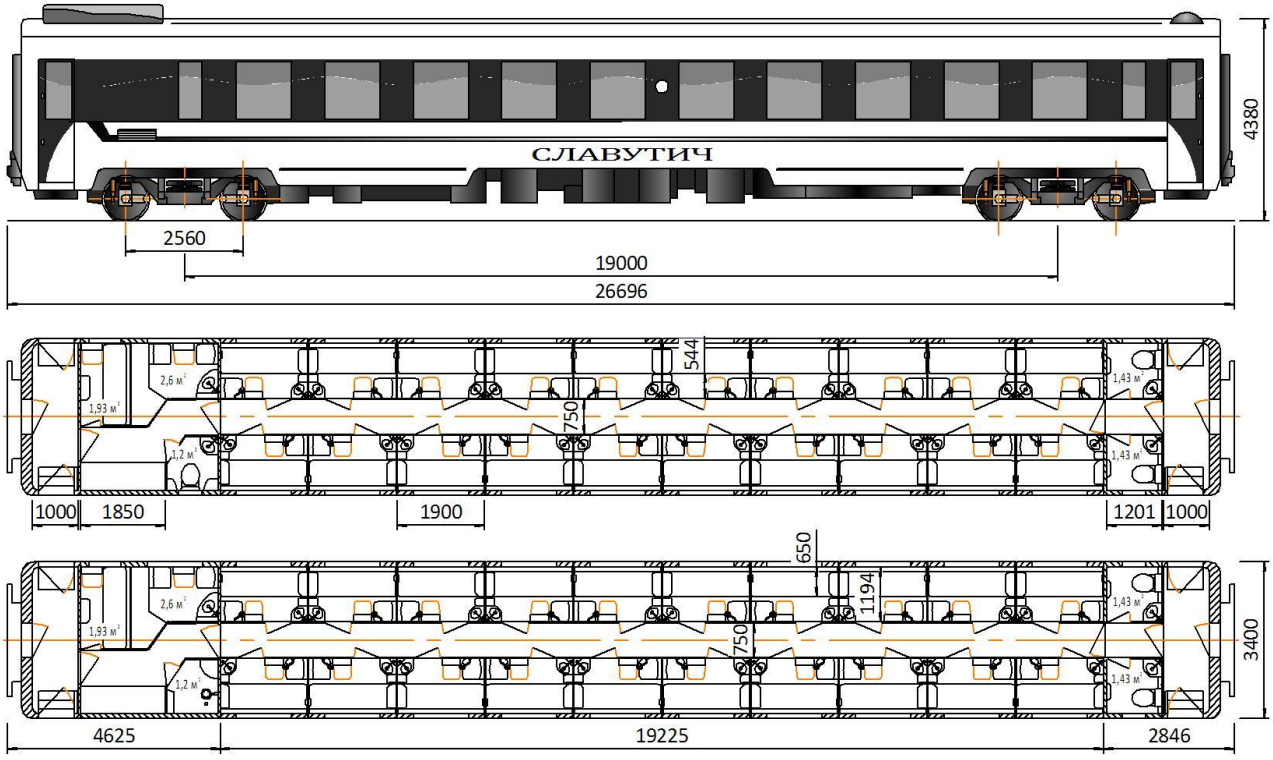


Рис. 6. Проект перспективного конкурентоспроможного купейного вагона sV-02.01 класу 1-СВ** вмістимістю 20 ос.

Таблиця 2

Оцінка комфортабельності перспективного купейного вагона класу 1-СВ**

Найменування параметра	Модель вагона			
	61-779А	перевага		sV-02.01
Клас вагона	1-СВ*			1-СВ**
1	2	3	4	5
Габаритні розміри вагона, м:				
- ширина по кузову;	3,021		+	3,400
- довжина пасажирського салону	17,939		+	19,225
Ширина проходу по вагону, м	0,8	+		0,75
Кількість тамбурів	2			2
Кількість пасажирських купе:	10			20
- вмістимість купе, ос.	2			1
Вмістимість вагона, ос.	20			20
Розмірні параметри пасажирського купе:				
- площа, м^2;	3,5			2,27
- питома площа, м^2/пас.;	1,75		+	2,27
- довжина спального дивана, м;	1,9	+		1,88
- ширина спального дивана, м	0,587		+	0,65
Параметри купе для відпочинку провідників: - площа, м^2;	2,5	+		1,93

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
- параметри спальної полиці, м: - довжина;	1,9	+		1,768
- ширина;	0,587		+	0,6
- відстань від дивана до перегородки, м	0,684	+		0,5
Параметри службового купе провідників: - площа, м^2 ;	2,6			2,6
- кількість місць для сидіння, од.	1		+	2
Параметри туалетного приміщення: - кількість, од.;	2			2
- площа, м^2 ;	1,4		+	1,43
- площа, м^2	1,5	+		1,43
Параметри душового приміщення: - кількість;	-		+	1
- площа, м^2	-		+	1,20
Комплектація пасажирського купе: - спальний диван;	2		+	1
- місце для сидіння;	-		+	1
- гнучкий світильник;	-		+	1
- розкладний столик;	1			1
- вішак для одягу;	1			1
- умивальник;	-		+	1
- ящик для сміття	-		+	1
Сума переваг		6	14	

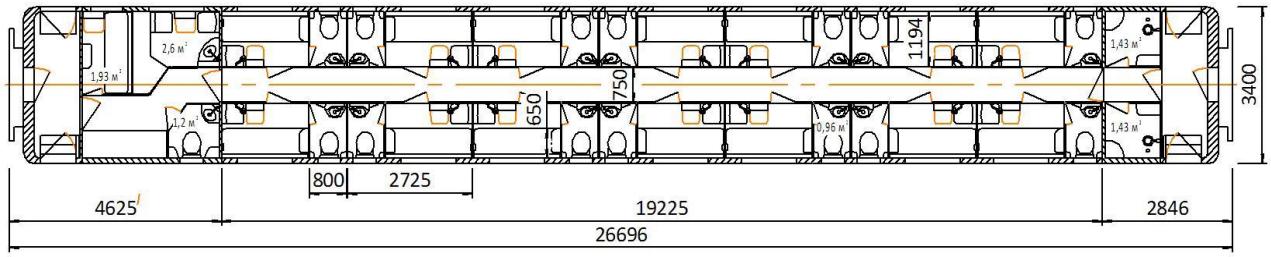


Рис. 7. Проект перспективного конкурентоспроможного купейного вагона sV-02.01 класу 1-СВ*** вмістимістю 14 ос.

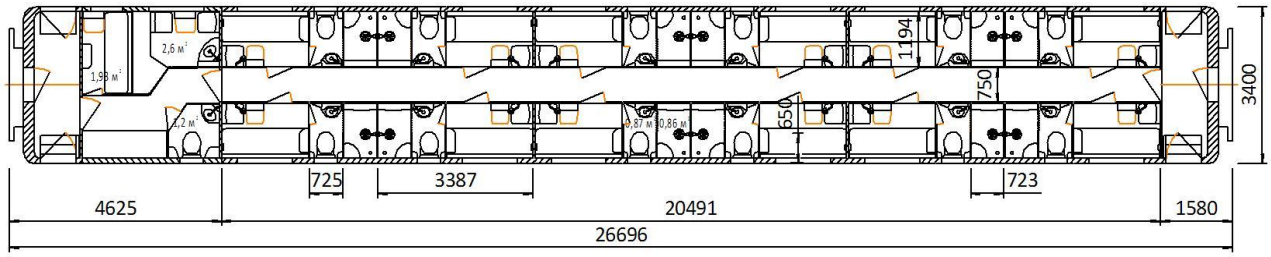


Рис. 8. Проект перспективного конкурентоспроможного купейного вагона sV-02.03 класу 1-СВ**** вмістимістю 10 ос.

Висновки. Запропонована компонувальна схема купейних спальних вагонів класу 1-СВ на основі розташування одномісних купе вздовж їх боковин з центральним поздовжнім проходом по вагону шириною 3,4 м забезпечує створення перспективних конкурентоспроможних вагонів різної вмістимості суттєво вищої комфортабельності у порівнянні з існуючими купейними спальними вагонами класу 1-СВ (1-СВ*):

- класу 1-СВ** вмістимістю 20 ос., одномісні пасажирські купе яких по відношенню до купе існуючих вагонів класу 1-СВ додатково обладнані м'яким сидінням, гнучким світильником, розміщеним біля сидіння і відкидного столика, та умивальником із дзеркалом і ящиком для сміття;

- класу 1-СВ*** вмістимістю 14 ос., одномісні пасажирські купе яких обладнані замість умивальника з дзеркалом і ящика для сміття окремим приміщенням з індивідуальним вакуумним туалетом, умивальником із дзеркалом та ящиком для сміття;

- класу 1-СВ**** вмістимістю 10 ос., одномісні пасажирські купе яких за комплектацією аналогічні до купе вагонів класу 1-СВ*** і додатково обладнані індивідуальною душовою кабіною.

Вагони проекту sV-02.01 класу 1-СВ** тієї самої вмістимості (20 ос.), що й існуючі вагони моделі 61-779А класу 1-СВ*, але суттєво вищого рівня комфортабельності, сприятимуть збільшенню попиту за умови однаковості цін на проїзд у цих вагонах.

Вмістимість пропонованих проектів купейних спальних вагонів класів 1-СВ**, 1-СВ*** та 1-СВ**** за умови традиційного поперечного розташування у вагонах тільки одномісних пасажирських купе суттєво переважає їхню вмістимість. Наприклад, при аналогічній ширині вагонів (3,4 м) та порівнянних інших розмірних параметрах і комплектаціях вагонів і пасажирських купе вмістимість вагонів проекту sV-02.01 більша на 5 ос.

Список використаних джерел

1. «Укрзалізниця» на межі розвалу: 92 % пасажирських вагонів скоро підуть на звалище. URL: https://znaj.ua/society/218197-ukrzaliznicya-na-mezhi-rozvalu-92-pasazhirskih-vagoniv-skoro-pidut-na-zvalishche (дата звернення: 10.10.2019).
2. Zhang Y., Wang J., Cai W. Passengers' Demand Characteristics Experimental Analysis of EMU Trains with Sleeping Cars in Northwest China. Sustainability, 2019. P. 1-17. URL: https://doi:10.3390/su11195338 (last access: 10.10.2019).
3. Wencheng H., Bin S. A methodology for calculating the passenger comfort benefits of railway travel. Journal of Modern Transportation, 2018. P. 107-118. URL: https://doi:10.1007/ s40534-018-0157-y (last access: 10.10.2019).
4. Steer Davies Gleave supported by TRASPOL - Politecnico di Milano, 2017. Research for TRAN Committee – Passenger night trains in Europe: the end of the line? European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, 2017. P. 1-228. URL: http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ STUD/2016/585891/IPOL_STU(2016)585891_EN.pdf (last access: 10.10.2019).
5. Донченко А. В. та ін. Типаж перспективних пасажирських вагонів локомотивної тяги для магістральних залізниць України. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна,* 2007. № 14. С. 132-135.
6. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити наближення будівель і рухомого складу залізниць колії 1520 (1524) мм (ГОСТ 9238-83, MOD). Чинний від 2012-12-01. Київ, 2012. 50 с.

7. ПАТ «Крюковский вагоностроительный завод». Пассажирское вагоностроение. Каталог. URL: http://www.kvsz.com/images/catalogs/tsn.pdf (дата звернення: 10.10.2019).

8. ТОО «Вагонобудівний завод «Тулпар». URL: https://tulpar.com.kz/ (дата звернення: 10.10.2019).

9. ДСТУ 4049-2001. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Вимоги безпеки. Київ: Держстандарт України, 2001. 24 с.

10. О+Р 562. Санитарно-технические требования к конструкции пассажирского вагона. Комитет ОСЖД. Изд. 2. Тегеран, 2007. 22 с.

11. СП 2.5.1198-03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. Департамент здравоохранения. МПС РФ. Москва, 1998. 46 с.

Войтків Станіслав Володимирович, канд. техн. наук, генеральний конструктор ТзОВ «Науково-технічний центр «Автополіпром», заслужений машинобудівник України. Тел. (067) 447-04-90. E-mail: voytkivsv@ukr.net.

Voytkiv Stanislav, PhD (Tech). General designer «Scientific and technical Center «Autopoliprom». The deserved machine engineer of Ukraine. Tel. (067) 447-04-90. E-mail: voytkivsv@ukr.net.

Статтю прийнято 07.11.2019 р.

УДК 656.072

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ПАССАЖИРО-ЧАСА ПРИ ВВЕДЕНИИ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Канд. техн. наук П. В. Ковтун, старш. преп. Т. А. Дубровская

EVALUATION OF THE COST OF A PASSENGER-HOUR AT INTRODUCTION SPEED MOVEMENT

PhD (Tech.) P. V. Kovtun, Sr. Lecturer T. A. Dubrouskaya

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206191

Сокращение времени в пути влечет за собой увеличение стоимости проезда, а, следовательно, и стоимости пассажиро-часа. В статье предлагается применять новый подход к определению стоимости пассажиро-часа, который будет учитывать денежные затраты, необходимые для реализации скоростного движения поездов.

Рассмотрены способы определения стоимости пассажиро-часа различными методами. Предложен новый подход для оценки стоимости пассажиро-часа при введении скоростного движения. В данном исследовании предлагается использовать при определении стоимости пассажиро-часа строительные и эксплуатационные затраты, необходимые для реализации скоростного движения пассажирских поездов.

Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, скорость, билет, пассажиро-час, стоимость.*

The time spent by passengers on the movement can be estimated in value terms. For this purpose such criterion as the time saved for a trip reflected in cost of one passenger-hour is used. The determination of the cost of passenger-hour is conditional, as it includes a number of factors, the actual value of which is either not known or difficult to determine (the assessment of the

significance of time losses of each member of the society is individual). Thanks to the introduction of this indicator, it is possible to economically justify the use of expensive rolling stock, the speed of movement on which is higher, due to which the time spent by passengers on trips is reduced.

It is difficult to imagine that each person makes calculations of all options of movement between points: compares waiting time, moving time, comfort, financial costs, etc. basically, each movement is a compromise between lost time and financial costs (the higher the speed of movement, the greater its cost). However, the passenger uses the accumulated experience, prioritizes when making a decision and it will usually be close to optimal.

The reduction of travel time entails an increase in the cost of travel, and, consequently, the cost of passenger-hour. The article proposes to apply a new approach to determining the cost of passenger-hour, which will take into account the monetary costs necessary for the implementation of high-speed train traffic.

The ways of determining the cost of passenger-hour by different methods are considered. A new approach is proposed to estimate the cost of passenger-hour with the introduction of high-speed traffic. In this study, it is proposed to use in determining the cost of passenger-hour construction and operating costs necessary for the implementation of high-speed passenger trains.

Keywords: *ailway transport, speed, ticket, passenger-hour, cost.*

Введение. В современном мире практически каждый человек предъявляет свои требования к качеству, комфорту и скорости перемещения. Для любого человека время ожидания чего-либо считается потерянным временем. Это можно отнести и ко времени, затрачиваемому пассажиром в пути. То есть, чем быстрее человек прибудет в пункт назначения, тем меньше времени он потратит «впустую». Следовательно, любой вид транспорта пытается ускорить доставку пассажиров, чтобы сэкономить время. Однако за любое ускорение требуется дополнительная плата.

Анализ последних достижений и публикаций. Проблемами экономической оценки введения скоростного движения поездов занимались такие известные ученые, как Б. А. Волков [1], А. А. Васюнина [2], Н. Б. Курган [3], Д. Н. Курган [4], А. А. Босов [5], Б. М. Лапидус, Н. П. Терешина [6], П. В. Ковтун, Т. А. Дубровская [7], А. С. Блохина [8] и другие. Среди зарубежных ученых, которые исследуют данную проблему, можно выделить авторов работ [9, 10].

Определение цели и задачи исследования. Время пассажиров в пути можно оценить в денежном эквиваленте. Для этого используется такой критерий, как сэкономленное за поездку время, отраженное в стоимости одного пассажиро-часа [1], которая может состоять из различных критериев, которые определить практически невозможно. Тем более, что в поездах передвигается разный по целям и составу пассажиропоток.

Основная часть исследования. Существует несколько методов оценки пассажиро-часа, базирующихся на разных исходных предпосылках. Ранее в условиях плановой экономики для расчета стоимости пассажиро-часа $e_{\text{п-ч}}$ использовалась формула [2]

$$e_{\text{п-ч}} = \frac{\alpha}{720} / (\varphi \cdot C_{\text{нд}} + \varepsilon \cdot C_{\text{зп}}) + 30 C_{\text{с}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{нд}}$ – месячная доля абсолютного размера национального дохода, приходящегося на 1 работника производительной сферы;

$C_{\text{зп}}$ – средняя месячная зарплата работников непроизводительной сферы;

$C_{\text{с}}$ – средняя величина суточных, выплачиваемых пассажирам, совершающим деловые поездки;

α, φ, ε – коэффициенты, учитывающие структуру пассажиропотока.

Данная методика оценки стоимости пассажиро-часа, исходит из национального дохода или чистой продукции, созданной за 1 человеко-час.

Другой вариант методики предлагает принимать за стоимость пассажиро-часа оценку 1 человеко-часа занятого населения, когда тариф на проезд в поездах устанавливается на 1-го пассажира. При этом тарифы являются едиными на всей территории города или целого региона. Пересмотр тарифов проводится эпизодически в увязке с инфляцией в стране.

Исследования показали, что одним из вариантов определения стоимости пассажиро-часа является оценка тарифной ставки.

Принцип формирования тарифной стоимости билета – зонный, длина одной зоны увеличивается в зависимости от общего расстояния. Каждая зона имеет длину и границы. Также для расчета используются следующие данные: расстояние, дата поездки (для определения сезонного коэффициента); род вагона и категория. В результате расчетов получается базовая стоимость билета (без услуг и сервисных сборов)

$$P = (L_{\text{а}} + L_{\text{п}})P_{1\text{км}}MK_S, \qquad (2)$$

где $L_{\text{п}}$ – расчетное расстояние, км;

$L_{\text{а}}$ – добавочное расстояние, зависящее от категории вагона, км;

$P_{1\text{км}}$ – стоимость одного километра, исходя из типа, категории поезда и вагона;

M – межгосударственный коэффициент;

K_S – сезонный коэффициент, определяемый исходя из даты поездки.

Например, в Республике Беларусь стоимость проезда в пассажирском либо в скором пассажирском поезде определяется исходя из тарифного пояса, расстояния, типа вагона по специальным таблицам, в которых приводится стоимость в швейцарских франках на 1 километр пути (табл. 1). Путем умножения тарифа на длину участка следования получают базовую стоимость билета.

Таблица 1

Стоимость билета в пассажирском скором поезде (в швейцарских франках)

Номер тарифного пояса	Расстояние от и до, км	Пассажирский поезд			
		жесткий вагон, места для сидения	жесткий вагон, спальные места	жесткий вагон, 4-местные купе, спальные места	мягкий вагон, 2-местные купе (СВ)
01	1 – 10	1,10	1,20	1,80	3,63
02	11 – 20	1,18	1,30	1,95	3,88
03	21 – 30	1,25	1,38	2,08	4,15
…	…	…	…	…	…
37	1301 – 1400	10,28	12,88	19,38	38,83

В тоже время в формировании стоимости билета в Российской Федерации используется принцип «динамического ценообразования» [3]. Суть его в том, что перечень направлений отбирается проведением маркетинговых опросов и согласованием с государственными регулирующими органами. В зависимости от дня недели, сезона и объемов перевозок, действуют разные тарифы. При этом, иногда стоимость купе и плацкарта разнятся незначительно. В начале продажи

билетов стоимость их минимальна согласно тарифам (за 45 дней до отправления поезда). Далее, по мере того, как выкупаются билеты, при высоком спросе на билеты конкретной даты и направления, стоимость их увеличивается. Следовательно, чем выше спрос и меньше мест, тем выше цена на билеты. Однако, в случае низкого спроса, а также при наличии в свободной продаже на рынке более низких тарифов конкурентов, продажа по низким тарифам может продолжаться вплоть до даты отправления.

На Белорусской железной дороге с 10 октября 2019 г. открыта продажа проездных документов на поезда международных линий Полоцк–Москва, Брест–Москва и с 25 октября 2019 г. для поезда Гомель–Москва (с учетом группы беспересадочных вагонов поездов Брест–Москва) в купейные вагоны и вагоны СВ с применением системы динамического управления тарифами в международном сообщении. Этот проект направлен на повышение привлекательности пассажирских перевозок железнодорожным транспортом и снижение тарифной нагрузки на пассажиров. Он реализуется совместно с ОАО «РЖД» [4].

Очевидно, при введении скоростного движения на существующих линиях сокращается время пассажира в пути. Основной экономический показатель поездки представляет собой сумму стоимости проезда и произведения стоимости пассажиро-часа и затрат времени на поездку. Если человек оценивает свое время низко, то для него приобретает большее значение стоимость проезда, и наоборот.

Сокращение времени в пути влечет за собой увеличение стоимости проезда, а, следовательно, и стоимости пассажиро-часа. В статье предлагается применять новый подход к определению стоимости пассажиро-часа, который будет учитывать денежные затраты, необходимые для реализации скоростного движения поездов.

Исследования железнодорожных маршрутов различных стран и направлений позволяют выявить зависимость стоимости пассажиро-часа от дальности маршрута и количества сэкономленного времени. Если рассмотреть стоимость билета пассажирского и скорого поездов, то заметна как существенная разница в стоимости билета, так и во времени нахождения в пути (табл. 2).

Таблица 2

Определение средней стоимости времени пассажиров в пути

Направление	Стоимость проезда в пассажирском поезде, бел. руб.		Время в пути, ч	Стоимость проезда в скором (скоростном) поезде, бел. руб.		Время в пути, ч
	купе	плацкарт		купе	плацкарт	
Москва-Санкт-Петербург	188,60	101,74	8,39	«Сапсан»		3,33
				240,66	119,10	
Минск-Киев	122,68	68,38	11,41	107,14	75,62	10,39
Москва-Минск	141,60	70,56	9,58	«Talgo»		8,48
				156,04	84,16	
Москва-Брест	159,06	84,68	14,41	«Talgo»		91,04
				179,96	102,40	
Гомель-Минск	16,58	12,54	7,30	«Stadler»		2,54
				20,0		
Средняя стоимость пассажиро-часа				6,6 бел. руб.		

Проанализировав некоторые направления железнодорожных линий, можно получить среднюю оценку времени пассажиров. По данным расчетов, она составила около 6,6 бел. руб.

Исходя из учета средней прибыли $P_{ср}$ можно определить фактическую стоимость пассажиро-часа сэкономленного времени

$$e_{пас\text{-}ч} = \frac{K_{рек} + (K_{пс} - K_{пс(воз)}) \pm \Delta C(1 + P_{ср})T_н}{730 n_{пас} m \alpha_{зап} \Delta T T_н}, \quad (3)$$

где $P_{ср}$ – средняя прибыль в отрасли.

Анализируя формулу (3) с учетом дополнительных затрат на реконструкцию линии под скоростное движение, а также изменение времени нахождения пассажира в пути, можно сказать, что стоимость проезда в скоростном поезде увеличится примерно на 20-25 %. При этом в увеличение стоимости входят:

- стоимость реконструкции пути для повышения скорости движения $K_{рек.}$;
- стоимость закупки дорогого нового современного подвижного состава с учетом возврата от продажи существовавшего подвижного состава ($K_{пс.}$-$K_{пс(воз.)}$);
- увеличение эксплуатационных расходов в связи с увеличением скорости движения $\pm \Delta C$;
- коэффициент съема грузовых поездов (т. е. простой для пропуска скоростных поездов).

Тогда пассажиры, сэкономившие в пути за счет внедрения скоростного движения ΔT часов, платят за это в период нормативного срока окупаемости $T_н$

$$[K_{рек} + (K_{пс.} - K_{пс(воз.)})] / T_н + \Delta C(1 + P_{ср.}) = 730 n_{пас} m \alpha_{зап} \Delta T e_{пас\text{-}ч}. \quad (4)$$

Выводы. Следовательно, в целях сравнения вариантов и принятия проектных решений в проектах строительства и реконструкции железных дорог в данном исследовании предлагается использовать при определении стоимости пассажиро-часа строительные и эксплуатационные затраты, необходимые для реализации скоростного движения пассажирских поездов.

Список использованных источников

1. Волков Б. А., Турбин И. В., Свинцов Е. С., Лобанова Н. С. Экономические изыскания и основы проектирования железных дорог: учеб. пособие. Москва: Маршрут, 2005. 408 с.
2. Васюнина А. А. Экономическая эффективность реконструкции железнодорожных линий для организации скоростного пассажирского движения: автореф. дисс... канд. экон. наук: 08.00.05. ОАО «ВНИИЖТ». Москва, 2008. 24 с.
3. Курган Н. Б., Маркова П. С. Экономическая эффективность от устранения ограничений скорости движения поездов, обусловленных просрочкой ремонтов. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*. Днепропетровск, 2007. Вып. 19. С. 84–87.
4. Курган Д. Н. Методология расчетов железнодорожного пути при взаимодействии со скоростным подвижным составом: автореф. дисс… д-ра техн. наук: 05.22.06. УкрГУЖТ. Днепр, 2017. 35 с.
5. Босов А. А. Повышение эффективности работы транспортной системы на основе структурного анализа: монография. Днепропетровск, 2005. 200 с.

6. Лапидус Б. М., Терешина Н. П., Трихункова Н. Ф. Экономика железнодорожного транспорта: учеб. пособие. Москва: УМК МПС России, 2001. 600 с.

7. Ковтун П. В., Дубровская Т. А. Анализ влияния непогашенного ускорения на скорость движения пассажирских поездов. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*. Днепр, 2018. Вып. 181. С. 6–15.

8. Блохина А. С. Экономическая оценка мероприятий по внедрению новых профилей поверхности катания колес подвижного состава железных дорог. *Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*. Днепропетровск, 2010. Вып. 31. С. 256–262.

9. Corinne Blanquart, Martin Koning. The local economic impacts of high-speed railways: Theories and facts. European Transport Research Review (ETRR), 2017. 9 (2). 14 p.

10. Givoni, M. Development and Impact of the Modern High-speed Train: A Review. Transport Reviews, 2006. Vol. 26. Iss. 5. P. 593-611.

Ковтун Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.
Тел.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.
Дубровская Татьяна Алексеевна, старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.
Тел.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Kovtun Pavel Vladimirovich, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport. Tel.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.
Dubrovskaya Tatyana Alekseevna, Senior Lecturer, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State Transport University. Tel.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Статтю прийнято 13.11.2019 р.

УДК 656.13.58

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ ЗМІШАНОГО МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ

Д-р техн. наук В. П. Сахно, кандидати техн. наук С. М. Шарай, В. М. Поляков, асист. Д. О. Дехтяренко, магістр Д. А. Бабина

THE THEORETICAL BASIS FOR USING THE MIXED METHOD OF MULTI-CRITERIAL ANALYSIS FOR ROUTING OF CARGO TRANSPORTATION

D. Sc. (Tech.) V. Sakhno, PhD (Tech.) S. Sharai, PhD (Tech.) V. Poliakov, assistant D. O. Dekhtiarenko, master D. A. Babyna

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206196

В статті розглядаються можливості вирішення завдання маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів, які можуть виконуватись із залученням різних видів транспорту, за допомогою змішаного методу прийняття рішення на основі багатокритеріального аналізу з використанням штучних нейронних мереж. Формування маршруту доставки вантажу та визначення видів транспорту для виконання перевезень на

ділянках прямування маршруту здійснюються з урахуванням критеріїв вибору та оцінювання, вага впливу яких визначається методом розмитих коефіцієнтів. За допомогою програмного середовища MSExcel сформовано 3-шарову нейронну мережу для маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів. На основі проведених розрахунків за сукупним ефектом декількох критеріїв оцінювання визначені види транспорту для виконання перевезень на ділянках маршруту доставки вантажу у міжнародному сполученні.

Ключові слова: *маршрутизація перевезень, вид транспорту, критерій вибору, багатокритеріальний аналіз, змішаний метод, нейронна мережа.*

The article deals with the possibilities of solving the problem of multimodal freight routing that can be performed with the involvement of different types of transport, using a mixed decision method based on multi-criteria analysis using artificial neural networks. The issues of planning, organizing and ensuring the implementation of the transport-technological process of cargo delivery in the international connection are connected with the solution of a number of tasks, among which the important place is occupied by the routing of transportations and the choice of efficient types of transport for their fulfillment. Their solution is aimed at the efficient use of the transport resources of the enterprise to fulfill orders for the transportation of goods while ensuring their quality and efficiency in terms of costs incurred. Carrying out transportation on the developed rational routes of cargo delivery increases the efficiency of vehicles of different types of transport, the efficiency of transport enterprises, reducing the logistical costs of all participants in the logistics chain of cargo delivery. Effective planning of the transportation process involves forecasting the receipt of requests for transportation, the volume of transportation in different customs modes, variants of routes of transportation and the use of type of transport for their implementation, etc., which can be implemented with the help of modern mathematical apparatus for the formation of artificial neural networks. Artificial neural networks can be used for form of cargo delivery routes and in the choice of types of transport, as they allow accurate forecasts, taking into account many factors that affect the transport process. Formation of the route of delivery of cargo and definition of types of transport for the performance of transportations on the sections of the route are carried out taking into account the selection and evaluation criteria, the weight of influence of which is determined by the method of blurred coefficients. Using the MS Excel software environment, a 3-layer neural network was formed to route multimodal cargo transportation. Based on the calculations made by the cumulative effect of several evaluation criteria, the types of transport for the transportation on the sections of the route of delivery of goods in international traffic were determined.

Keywords: *transportation routing, type of transport, selection criterion, multi-criteria analysis, mixed method, neural network.*

Вступ. Питання планування, організації та забезпечення виконання транспортно-технологічного процесу доставки вантажів у міжнародному сполученні пов’язані із вирішенням ряду завдань, серед яких важливе місце займають маршрутизація перевезень і вибір ефективних видів транспорту для їхнього виконання. Вирішення цих завдань спрямоване на ефективне використання транспортних ресурсів підприємства для виконання замовлень на перевезення вантажів при забезпеченні їхньої якості та ефективності з точки зору понесених витрат. Виконання перевезень за розробленими раціональними маршрутами доставки вантажу підвищує ефективність використання рухомого складу, ефективність роботи підприємств транспорту, зменшуючи логістичні витрати всіх учасників логістичного ланцюга доставки вантажів. Ефективне планування

виконання перевізного процесу передбачає прогнозування надходжень заявок на перевезення, обсягів перевезень в різних митних режимах, варіантів маршрутів перевезення та використання видів транспорту для їхнього виконання тощо, яке можна реалізувати за допомогою сучасного математичного апарату формування штучних нейронних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи вирішення завдань організації та виконання процесу перевезення вантажів потребують удосконалення з урахуванням запитів і вимог, які висуваються замовниками транспортних послуг, факторів, які впливають на перевізний процес, що потребує від надавачів таких послуг використання сучасних математичних методів та програмних засобів. Для вирішення завдань маршрутизації використовують багатокритеріальний аналіз. При формуванні маршрутів доставки вантажів та виборі видів транспорту для виконання перевезень можуть бути застосовані штучні нейронні мережі [1-13]. Науковцями пропонується використання змішаного методу щодо прийняття рішень при визначенні критерію вибору й оцінювання його ваги на основі поєднання багатокритеріального аналізу та нейронної мережі [14-16].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є формування маршруту доставки вантажу у міжнародному сполученні з вибором виду транспорту для виконання перевезень на різних ділянках маршруту за допомогою змішаного методу прийняття рішення на основі багатокритеріального аналізу з використанням штучних нейронних мереж.

Для досягнення сформованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- сформувати критерії вибору для визначення виду транспорту, яким буде здійснюватись перевезення на відповідній ділянці маршруту, та параметри їх оцінювання;
- встановити ваги вхідних даних першого шару нейронної мережі шляхом використання методу розмитих коефіцієнтів;
- побудувати 3-шарову нейронну мережу для маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів;
- сформувати маршрут доставки вантажу у міжнародному сполученні;
- визначити види транспорту для виконання перевезень вантажу на ділянках прямування маршруту.

Основна частина дослідження. З метою формування маршруту доставки вантажу та вибору виду транспорту для виконання перевезень вантажів з використанням мультимодальної транспортної мережі розглядаються критерії вибору, що включають критерії їх оцінювання, структура яких наведена на рис. 1 [14].

Згідно з рис. 1 на першому рівні виконується маршрутизація мультимодальних перевезень. На другому рівні розташовані фактори для вибору виду транспорту, які наведені у вигляді вартості, часу та якості перевезення, технічних характеристик транспортного засобу, якості надання транспортних послуг та впливу на економіку країни. Підфактори на третьому рівні подано у вигляді 15 критеріїв оцінювання.

Для визначення ваги впливу критеріїв вибору використовується метод розмитих коефіцієнтів [17-18], базуючись на експертних оцінках. Формування ваги вхідних даних першого шару нейронної мережі шляхом використання методу розмитих коефіцієнтів здійснюється за таким алгоритмом [17]:

- розроблення системи розрахунків розмитих коефіцієнтів;
- синтез отриманої системи з класичним методом переходу;
- формулювання підходів для здійснення остаточного ранжування.

Розмиті коефіцієнти – це зважені показники впливу згладжування переходу

від бальної до рангової форми, тобто для m-кількості послідовностей з n-кількістю елементів вони відповідно складають

$$y_i^m = \frac{Z_i^m}{\sum_{i=1}^{n^m} Z_i^m}, \qquad (1)$$

де y_i^m – розмитий коефіцієнт переходу від бальної до рангової форми для i-го елемента m-ї послідовності;

n^m – кількість елементів в m-й послідовності;

z_i^m – зважена зворотна величина від бальної оцінки.

Рис. 1. Ієрархічна структура критеріїв вибору виду транспорту при маршрутизації мультимодальних перевезень

Для здійснення переходу необхідне виконання вимоги $n^m = const$, тобто кількість елементів у всіх послідовностях має бути величиною постійною. В разі невиконання наданої вимоги потрібно вводити додаткові елементи з нульовим значенням. Зважена зворотна величина від бальної оцінки знаходиться за виразом

$$Z_i^m = \frac{\max_{i=1}^{S}(x_i)}{x_i}, \qquad (2)$$

де x_i – бальна оцінка i-го елемента;

$\max_{i=1}^{S}(x_i)$ – максимальний бал по всіх елементах всіх m-послідовностей;

S – загальна кількість елементів у всіх послідовностях, $S = n^m \times m$.

Для здійснення синтезу отриманої системи з класичним методом переходу необхідно ввести однаковий для всіх послідовностей спеціальний додатковий коефіцієнт D:

$$D = \sum_{k=1}^{n} r_k, \qquad (3)$$

де r_k – ранг елемента послідовності.

Для максимального елемента, коли k=1, значення r_k= 1, тобто r_1=1. Для наступного елемента, коли k=2, значення r_k=2, тобто r_2=2.

Остаточний перехід здійснюється з використанням залежності

$$R_i^m = D \times y_i^m, \qquad (4)$$

де R_i^m – скоригований за допомогою розмитих коефіцієнтів ранг i-го елемента.

Для перевірки узгодженості критеріїв оцінювання використаємо коефіцієнт кореляції рангів Спірмена:

$$p = 1 - \frac{6 \times S(d^2)}{n^3 - n}, \qquad (5)$$

де $S(d^2)$ – сума квадратів відхилення.

Для застосування методу розмитих коефіцієнтів сформовано вихідні дані коефіцієнтів критеріїв оцінювання, отриманих на основі експертних оцінок. З використанням виразів (1-4) виконано переведення результатів опитування з бального до рангового вигляду з застосуванням розмитих коефіцієнтів та без них і сформовано вихідні дані у ранговому вигляді. За виразом (5), розрахована узгодженість оцінок експертів за допомогою коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена, які показують динамічну зміну залежності між експертними оцінками для визначених пар експертів, у той час як коефіцієнти, розраховані без розмитих коефіцієнтів, такої динаміки не показують. Наведено вхідні дані для вхідного (першого) нейронного шару нейронної мережі з використанням отриманих коефіцієнтів, які враховують вагу впливу досліджуваних критеріїв оцінювання.

Вирішення завдання маршрутизації запропонованим змішаним методом для формування маршруту перевезення вантажу у міжнародному сполученні та вибору виду транспорту на відповідній ділянці маршруту відбувається шляхом дотримання такого положення: завдання багатокритеріального вибору функції $p = (X, f)$ з певною кількістю цільових функцій у випадку існування функції користі альтернатив $F(f(x))$ може бути апроксимована за допомогою 3-шарової нейронної мережі прямого поширення, яку «навчають» за допомогою методу зворотного поширення помилки (під навчанням мається на увазі підбір функціональної залежності, при якій дисперсія розкиду отриманих результатів буде мінімальною). В такому випадку нейронна мережа прямого поширення матиме один вихід та q - кількість входів і критеріїв оцінювання. При використанні нейронних мереж для вирішення завдання багатокритеріального вибору однорідний критерій методу зворотного поширення помилки є основою для побудови функції

користі $F(f(x))$. При вирішенні завдання багатокритеріального вибору шляхом використання нейронної мережі прямого поширення припускаємо, що вага нейронних зв'язків мережі є невід'ємною під час «навчання» даної мережі.

Використання математичного апарату формування штучних нейронних мереж знаходить своє застосування в різних напрямах вирішення завдань функціонування галузі транспорту. Основними сферами застосування нейронних мереж є апроксимація функцій, асоціативна пам'ять, стиснення даних, розпізнавання та класифікація, оптимізаційні задачі, керування складними процесами та прогнозування [4]. Одним з методів ефективного оперативного планування перевізного процесу є апарат штучних нейронних мереж [3]. Принцип роботи такої нейронної мережі базується на пошуку схожих параметрів процесу перевезень вантажів у міжнародному сполученні для формування відповідної тривалості виконання оборотного рейсу та використання виду транспорту при наявності інформації про замовників і виконавців перевезень, вид та обсяги вантажу, умови та вимоги до виконання перевезень. Одним з таких напрямів може стати прогнозування щодо формування варіантів маршрутів перевезення вантажу та вибору видів транспорту для їхнього виконання. При розробленні нейронної мережі для вирішення певного завдання слід розглянути декілька варіантів, що відрізняються, наприклад, кількістю нейронів у шарах, кількістю прихованих шарів тощо [5, 6]. Основними показниками, за якими можна виконати порівняння обраних нейронних мереж, можуть бути такі параметри, як мінімальна похибка, а також високий коефіцієнт кореляції між фактичними та розрахованими даними.

Розглянемо процес формування нейронної мережі з використанням змішаного методу прийняття рішення на основі багатокритеріального аналізу для вирішення завдання маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів. Структура алгоритму модифікованої нейронної мережі для вирішення завдання багатокритеріального вибору наведена на рис. 2 [14].

Змішаний метод вирішення завдання багатокритеріального вибору складається із таких кроків:

1. Визначення набору альтернативних варіантів. За альтернативи приймаємо цілі, з якими порівнюється основна мета.

2. Визначення критеріїв оцінювання шляхом аналізу релевантної інформації та експертних оцінок для виключення неможливих та некоректних альтернативних варіантів.

3. Ідентифікація нейромережних вузлів «вхід-вихід», враховуючи обмеження теорії нечітких чисел. Кількість вузлів шару входу має дорівнювати кількості гармонізованих критеріїв оцінювання, а результат оцінювання повинен знаходитись у шарі виходу таким чином, щоб шар виходу нейронної мережі мав лише один результат.

4. Формування опитування з наданням ваги критеріям оцінювання. Причому попарне порівняння здійснюється за допомогою трикутного нечіткого числа з вершиною (або центром) m, шириною лівої сторони l та шириною правої сторони u, та яке визначається системою з трьох елементів (l, m, u).

5. Надання ваги вхідним даним нейронної мережі, враховуючи обмеження теорії розмитих чисел.

Найпоширенішими функціями активації є сигмоїда або експонента (логістична функція). Лінійна функція використовується здебільшого в прихованому шарі, де відбувається безпосередній вибір за багатокритеріальним критерієм за умов нестрогої регулярності (стабільності): функція неперервна, обмежена, опукла та монотонно зростаюча. Незалежно від того, потрапить «тренування» нейронної мережі у локальний мінімум чи максимум, введені особою, що приймає рішення, вхідна вага критеріїв оцінювання впливатиме на час «тренування».

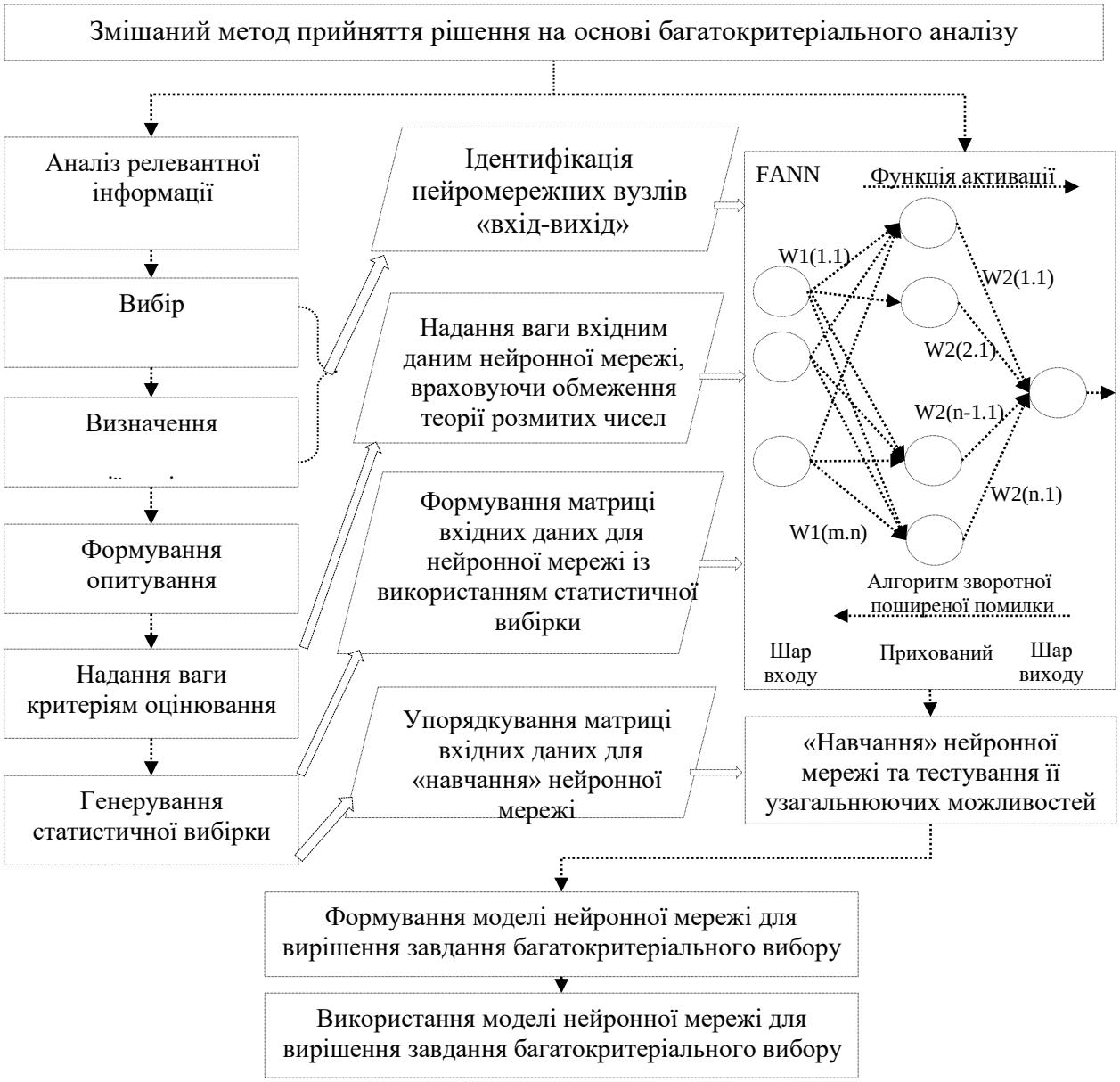


Рис. 2. Структура алгоритму модифікованої нейронної мережі для вирішення завдання багатокритеріального вибору

Таким чином, якщо вихідна вага критеріїв оцінювання занадто велика – сигмоїда досягне свого екстремуму з найменш можливою похідною, тоді похідні вхідних даних дорівнюватимуть нулю і процес «тренування» припиниться. Для досягнення максимальної збіжності нейронної мережі в процесі «тренування» пропонується використання методу нечітких чисел для розрахунку ваги критеріїв оцінювання з подальшим використанням результату розрахунків як вхідних даних для нейронної мережі.

Трикутне нечітке число $M_{ij,}(i, j = 1,2,...,n)$ виражає попарне порівняння i-го та j-го критеріїв оцінювання. Відповідно до теорії нечітких

чисел, комплексний ранг нечіткого числа i-го критерію оцінювання (S_i) визначається за формулою

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} M_{ij} \times \left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} M_{ij} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Величина S_i використовується для визначення рангу критеріїв оцінювання. $S_1 = (l_1, m_1, u_1)$ та $S_2 = (l_2, m_2, u_2)$. Ймовірність того, що $S_1 \geq S_2$ позначається як $V(S_1 \geq S_2)$ та визначається за формулою

$$V(S_1 \geq S_2) = 1, \text{ коли } m_1 \succ m_2,$$

$$V(S_1 \geq S_2) = \begin{cases} \dfrac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, l_2 \leq u_1 \\ 0, \textit{в іншому випадку} \end{cases}, \text{ коли } m_1 \leq m_2. \quad (7)$$

Якщо A_i описує i-й критерій оцінювання, тоді вага i-го критерію оцінювання нечіткого числа $w'(A_i)$ визначається за формулою

$$w'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)(k = 1,2,...,n, k \neq i). \quad (8)$$

Наведена нижче функція використовується для приведення до вигляду $w'(A_i)(i = 1,2,...,n)$:

$$w(A_i) = \frac{w'(A_i)}{\sum_{j=1}^{n} w'(A_j)} (i = 1,2,...,n). \quad (9)$$

6. Збір отриманої статистичної інформації. Для оцінювання за кількісним критерієм відбувається збір офіційних публікацій та проводиться дослідження. Для оцінювання за якісним критерієм проводиться опитування з метою визначення цінності альтернативних варіантів, отриманих при зборі інформації для кількісного критерію, за методом оцінювання (де 1 – дуже погано, 2 – погано, 3 – середньо, 4 – добре, 5 – дуже добре).

7. Упорядкування матриці вхідних даних для «навчання» нейронної мережі та тестування.

Отримані результати мають бути безкінечно малими величинами для того, аби:

- забезпечити сходження та пропорційність критеріїв оцінювання різних методів, які застосовуються;
- виключити випадки, коли використання багатокритеріального аналізу з нейромережною матрицею вхідних даних призводить до ситуацій, коли ефективність критеріїв меншої цінності більша, ніж ефективність пріоритетних критеріїв;
- досягнути максимальної гнучкості й ефективності сигмоїдної функції як функції активації з обмеженням вхідних даних від нуля до одиниці [0, 1].

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq q}(x_{ij})}; \quad (10)$$

$$r_{ij} = \frac{\min_{1 \le i \le q}(x_{ij})}{x_{ij}};$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \le i \le q}(x_{ij})}{\bar{x}_{ij} - \min_{1 \le i \le q}(x_{ij})}, \text{ коли } r_{ij} \in \left[\min_{1 \le i \le q}(x_{ij}), \bar{x}_{ij}\right]; \quad (11)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_{1 \le i \le q}(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_{1 \le i \le q}(x_{ij}) - \bar{x}_{ij}}, \text{ коли } r_{ij} \in \left[\bar{x}_{ij}, \max_{1 \le i \le q}(x_{ij})\right]. \quad (12)$$

Залежно від критеріїв оцінювання використовують такі методи стандартизації вихідних даних: для критерію ефективності - вираз (10) з метою забезпечення максимальної ефективності; для критерію витрат – вираз (11) з метою забезпечення мінімальних грошових витрат; для критерію достовірності вихідних даних – вираз (12) з метою забезпечення максимальної достовірності отриманих результатів.

8. Упорядкування матриці вхідних даних для «навчання» нейронної мережі. Якщо матриця вхідних статистичних даних є достатньою, гнучкою та піддається усередненню, тоді використання нейронної мережі дозволить отримати максимально достовірний результат із мінімальною імовірністю помилки, що свідчитиме про те, що підібрана функціональна залежність є придатною до використання виходячи із заданих вхідних даних. Проте, в загальному випадку, можлива лише скінченна дискретна множина альтернативних варіантів вирішення завдання багатокритеріального вибору. Для досягнення максимальної ефективності використання нейронної мережі рекомендується використання таких попарних вхідних даних, які задовольняють встановлені обмеження $F(f(x)) \succ F(f(y))$ [14].

$$r^{+} = \left\{r_1^{+}, r_2^{+}, \ldots, r_q^{+}\right\} r_j^{+} = \max_{i=1,\ldots,p} r_{ij}; \quad (13)$$

$$r^{-} = \left\{r_1^{-}, r_2^{-}, \ldots, r_q^{-}\right\} r_j^{-} = \min_{i=1,\ldots,p} r_{ij}; \quad (14)$$

$$r^{*} = \left\{r_1^{*}, r_2^{*}, \ldots, r_m^{*}\right\} = \left\{\frac{r_1^{+} + r_1^{-}}{2}, \frac{r_2^{+} + r_2^{-}}{2}, \ldots, \frac{r_q^{+} + r_q^{-}}{2}\right\}. \quad (15)$$

Припустимо, що найкращий варіант вирішення багатокритеріального завдання вибору має критерії оцінювання відповідно з найбільшим і найменшим пріоритетом, тому, застосовуючи принципи концепції TOPSIS [14-16] (англ. The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) – один із методів теорії багатокритеріального вибору, який базується на тому, що найкраща альтернатива, яка може бути обрана, розташована геометрично ближче до позитивного можливого варіанта

вибору (альтернативи) та далі від негативного можливого варіанта вибору (альтернативи), пропонується використання виразів (13) і (14) для визначення найбільш ефективного та найменш ефективного критеріїв оцінювання відповідно r^{+} та r^{-}. Із застосуванням виразів (12) і (13) за допомогою арифметичного середнього було визначено залежність (15) для розрахунку середнього значення r^{*}. Для забезпечення монотонного збільшення функції пар вхідних-вихідних значень при «навчанні» нейронної мережі рекомендується багаторазове використання виразів (12-14).

9. «Навчання» нейронної мережі та тестування її узагальнюючих можливостей:

а) поділ даних (статистичних та отриманих результатів) на два набори випадковим способом для утворення «навчального» і тестового наборів;

б) вибір структури нейронної мережі та встановлення параметрів «тренування»:

- визначення кількості шарів нейронної мережі;
- визначення кількості вхідних і вихідних вузлів (визначається виходячи з практичних міркувань);
- вибір початкової ваги критеріїв оціювання;
- встановлення швидкості навчання та стохастичного градієнта (ітеративний метод оптимізації градієнтного спуску за допомогою стохастичного наближення. Застосовується для прискорення пошуку цільової функції шляхом використання обмеженого за розміром тренувального набору, який вибирається випадково при кожній ітерації), максимальної величини похибки та максимального періоду навчання;

в) при досягненні максимальної величини похибки або максимального періоду навчання процес «навчання» нейронної мережі зупиняється;

г) перші три кроки повторюються для різних конфігурацій нейронної мережі з різними навчальними параметрами для вибору найкращої її структури. Для досягнення максимального ефекту рекомендується задавати вагу критеріям оцінювання у вигляді невід'ємних значень;

д) отримані результати оціювання використовуються для оцінювання апроксимуючої здатності нейронної мережі.

10. Формування моделі/конфігурації нейронної мережі для вирішення завдання багатокритеріального вибору.

Розглянемо, як приклад, вирішення завдання маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів, що можуть виконуватись із залученням різних видів транспорту (залізничного, автомобільного, авіаційного) з використанням нейронної мережі у напрямку Україна-Латвія, на транспортній мережі, яка включає такі транспортні вузли: м. Київ, м. Бориспіль, м. Рига, м. Лимбажи, для якого були задані такі параметри нейронної мережі:

- конфігурація мережі: три шари нейронів (один вхідний шар, один вихідний шар та один прихований шар);
- функція активації прихованого шару: сигмоїдна крива;
- кількість нейронів: у вхідному шарі – 6, у прихованому шарі – 6, у вихідному шарі – 6;
- алгоритм «навчання» нейронної мережі: метод зворотного поширення помилки;
- швидкість навчання: епоха – 100 ітерацій;
- максимальна середньоквадратична похибка отриманих даних: 0,25.

Проведені відповідно до поданого алгоритму дій операції щодо побудови нейронної мережі дали можливість сформувати модель 3-шарової нейронної мережі, яка була використана для маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів у міжнародному сполученні.

В результаті вирішення завдань для досягнення поставленої мети, а саме формування маршруту доставки вантажу у міжнародному сполученні з вибором виду

транспорту для виконання перевезень на різних ділянках маршруту за допомогою змішаного методу прийняття рішення на основі багатокритеріального аналізу з використанням штучних нейронних мереж, було визначено 6 груп критеріїв вибору та 15 критеріїв оцінювання, вага впливу яких визначалася за допомогою методу розмитих коефіцієнтів. На даній транспортній мережі було визначено 56 можливих варіантів комбінацій видів транспорту для виконання перевезень вантажу на відповідних ділянках маршруту. Використовуючи програмне середовище MSExcel, було створено 3-шарову нейронну мережу для маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів на оборотному рейсі м. Київ (Україна) – м. Лимбажи (Латвія) – м. Київ (Україна). Розрахована середньоквадратична похибка становила 0,034 %, що значно менше за задане значення максимальної середньоквадратичної похибки отриманих даних. Результатом розрахунків нейронної мережі стала комбінація таких видів транспорту для виконання перевезень: залізничний, автомобільний, авіаційний.

Висновки. Розглянуто питання формування маршруту доставки вантажу у міжнародному сполученні з вибором виду транспорту для виконання перевезень на різних ділянках маршруту за допомогою змішаного методу прийняття рішення на основі багатокритеріального аналізу з використанням штучних нейронних мереж. За допомогою програмного середовища MSExcel сформовано 3-шарову нейронну мережу для маршрутизації мультимодальних перевезень вантажів. На основі проведених розрахунків за сукупним ефектом декількох критеріїв оцінювання визначено види транспорту для виконання перевезень на ділянках маршруту доставки вантажу у міжнародному сполученні.

Список використаних джерел

1. Дорохов О. В. Маршрутизація перевезень фармацевтичної продукції на основі нейромережного підходу: Зб. наук. праць Харківського університету повітряних сил. 2009. Вип. 1. С. 153–156.
2. Дорохов О. В. Методика багатокритеріального вибору автобусів для міжміських перевезень та її комп'ютерна реалізація. Вестник ХНАДУ. 2008. Вып. 42. С. 117–120.
3. Bavarian B. Introduction to Neural Networks for intelligent Control. Control Systems Magazine, IEEE. 1988. № 6(2). P. 3–7. URL: https:// www.academia.edu/27779746/ Introduction_to_neural_networks_for_intelligent_control (last access: 13.10.2019).
4. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. Москва, 2006. 1104 с.
5. Руденко О. Г., Бодянський Є. В. Штучні нейронні мережі: навч. посібник. Харків, 2006. 404 с.
6. Новотарський М. А., Нестеренко Б. Б. Штучні нейронні мережі: обчислення. Праці Інституту математики НАН України. Київ, 2004. Т. 50. 408 с. URL: http://www.immsp.kiev.ua/ postgraduate/Biblioteka_trudy/ ShtuchnNejronMeregNester2004.pdf (дата звернення: 13.10.2019).
7. Вернигора Р. В., Єльнікова Л. О. Можливості використання штучних нейронних мереж при прогнозуванні поїзної роботи залізничних напрямків. Збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. Транспортні системи та технології перевезень. 2014. Вип. 7. С. 15–19.
8. Бодянский Е. В., Руденко О. Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения : монография. Харьков, 2004. 369 с.
9. Филиппенко О. И., Филиппенко И. Г. Биологические, искусственные и нейроавтоматные сети – сравнительный анализ. Ч. 2. Искусственные нейронные сети. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2005. № 3/2(15). С. 87–93.

10. Доценко Ю. В. Розробка математичної моделі оптимального використання технічних засобів залізниці на основі теорії нейронних мереж. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2005. № 6/2(18). С. 37–39.

11. Лаврухин А. В. Формирование интеллектуальной модели функционирования железнодорожной станции при выполнении поездной работы. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 1(55). С. 43–53.

12. Бережна Н. Г. та ін. Проблеми транспортно-логістичного забезпечення в аграрній галузі: монографія. Харків: Міськдрук, 2019. 180 с.

13. Колесников К. В., Карапетян А. Р., Никулин О. Г. Использование нейросетевых моделей для определения оптимального маршрута в сетях с адаптивной маршрутизацией пакетов данных. Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. трудов. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. Харьков, 2013. № 56(1029). С. 50–55.

14. Qu L., Chen Y. (2008) A Hybrid MCDM Method for Route Selection of Multimodal Transportation Network. In: Sun F., Zhang J., Tan Y., Cao J., Yu W. (eds) Advances in Neural Networks - ISNN 2008. ISNN 2008. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5263. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978–3–540–87732–5_42.

15. Estivill-Castro, Vladimir (20 June 2002). Why so many clustering algorithms – A Position Paper. ACM SIGKDD Explorations Newsletter 4(1): 65–75. doi:10.1145/568574.568575.

16. Jain, Murty, Flynn. Data clustering: a review. ACM Comput. Surv. 31(3). 1999.

17. Нагорний Є. В., Андросенко В. В. Розмиті коефіцієнти як засіб підвищення точності ранжування показників якості роботи експедиційних підприємств. Вісник КДПУ. 2006. Вип. 2(37). Ч. 1. С. 55–59.

18. Самородов В. Б., Андросенко В. В. Розмиті коефіцієнти як засіб підвищення точності ранжування показників якості роботи експедиційних підприємств. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник. АДІ «ДонНТУ». Горлівка, 2009. № 2(9). С. 132–140.

Сахно Володимир Прохорович, д-р техн. наук, професор кафедри автомобілів Національного транспортного університету. Тел. (067) 665-53-44. E-mail: svp_40@ukr.net.
Шарай Світлана Михайлівна, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету. Тел. (067) 783-31-80. E-mail: Svetasharai@gmail.com.
Поляков Віктор Михайлович, канд. техн. наук, доцент, професор кафедри автомобілів Національного транспортного університету. Тел. (067) 386-14-68. E-mail: poljakov_2006@ukr.net.
Дехтяренко Дарина Олександрівна, асистент кафедри менеджменту Національного транспортного університету. Тел. (067) 733-73-74. E-mail: rinada1980@gmail.com.
Бабина Діана Анатоліївна, магістр, група МП-2-1Національного транспортного університету.

Sakhno Volodymyr, D. Sc. (Tech.), Professor, Department of Automobile, National Transport University. Tel. (067) 665-53-44. E-mail: svp_40@ukr.net.
Sharai Svitlana, PhD (Tech.), Associate Professor, Professor of Department of International Transportation and Customs Control, National Transport University. Tel. (067) 783-31-80. E-mail: Svetasharai@gmail.com.
Poliakov Victor, PhD (Tech.), Associate Professor, Professor of Department of Automobile, National Transport University. Tel. (067) 386-14-68. E-mail: poljakov_2006@ukr.net.
Daryna Dekhtiarenko, Assistant, Department of 61 anagement, National Transport University. Tel. (067) 733-73-74. E-mail: rinada1980@gmail.com.
Babyna Diana, Master, Group MP-2-1, National Transport University.

Статтю прийнято 15.11.2019 р.

УДК 656.073

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ НЕСХОРОННОСТІ ВАНТАЖІВ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ УКРАЇНИ

Кандидати техн. наук В. М. Запара, Я. В. Запара,
магістранти Я. О. Хворостянна, І. О. Лейба

ANALYSIS OF FACTORS OF UNSAVED OF GOODS DURING TRANSPORTATION BY THE UKRAINIANRAILWAYS

PhD (Tech.) V. Zapara, PhD (Tech.) Y. Zapara, masters Y. Khvorostianna, I. Leiba

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206201

Досліджено стан несхоронних перевезень на залізничному транспорті України, проаналізовано фактори, що впливають на несхоронність вантажу, виконано їх класифікацію за ступенем керованості з боку перевізника. Наведено структурно-логічну схему факторів, що впливають на збереження вантажу при перевезенні залізничним транспортом, сформульовано цільову функцію мінімізації несхоронності вантажу в ланцюзі поставки в частині перевезення залізничним транспортом України з урахуванням реалій перевізного процесу та перспектив реструктуризації галузі.

Ключові слова: *фактор несхоронності, ризик несхоронності, ступінь керованості, структурно-логічна схема, цільова функція.*

The state of unsaved transportation on Ukrainian rail transport hasbeen observed in the article. It is shown that a rather highprobability of damage, theft of goods during transportation negativelyaffects the competitiveness of the freight carrier by the Ukrainianrailways.

Describing the causes of unsaved cargo allows identifying the mainessential factors of transportation process. This approach willoptimize the technological process of organizing transportation on thecriterion of cargo security.

The unsaved cargo factors and their classification according to thedegree of controllability on the part of the carrier and direction(transportability, organizational-technological, natural-climatic andsocio-political) are analyzed.

A structural and logical scheme of the factors affecting the unsaved goodsduring transportation by Ukrainian railways of iselaborated. The scheme details the factors of transportability,organizational, technological, natural-climatic and socio-political tofurther take into account the risks of cargo insecurity duringtransportation.

The system of products delivery should be organized in such a way thatthe total losses of cargo during the delivery to the final consumersought to the minimum level. A objective function is formulated takinginto account the requirements of all participants in the supply chain.

The component of unsaved cargo during transportation by rail isconsidered in more detail. It takes into account the transport processrealities and prospects of restructuring Ukrainian railways(allocation of railway infrastructure operator, traction operators andwagon operators), subject to the respective restrictions on eachstructure. The interpretation of the components of cargo insecurity inrelation to the operators of each structure is given.

Procedures are considered in relation to the unsaved factors by themain railway transport that allow offsetting their influence.

***Keywords**: unsaved factor, unsavedrisk, degree of controllability, structure and logic scheme, objectivefunction.*

Вступ. Несхоронність вантажів є досить суттєвим показником ефективності виду транспорту і відповідно впливає на його конкурентоспроможність. На практиці з метою забезпечення схоронності вантажів застосовують різні засоби, проте вони не гарантують повної їх схоронності. Досить висока вірогідність пошкодження, псування, крадіжки вантажів при перевезенні негативно впливає в першу чергу на конкурентоспроможність вантажного перевізника, в т. ч. і перевізника залізничним транспортом України.

Для реалізації системного підходу до завдання дослідження схоронності вантажу необхідно враховувати також фактори, які мають якісну природу описання, з урахуванням сучасних способів формалізації. Описання причин несхоронності вантажу надає можливість виявити домінантні фактори, що мають значення для перевізного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконаленню роботи із забезпечення схоронності вантажів науковцями приділяється достатня увага, особливо останнім часом, з початком впровадження автоматизованих систем контролю і технічного огляду стану вантажів, в т. ч. і в Україні (Кузнецов М. М., Лаврухін О. В., Ломотько Д. В. тощо) [1-7].

Аналіз цих публікацій вказує, що висвітлюється робота з реалізації конкретних напрацювань у даній сфері на найважливіших технічних станціях залізниць з урахуванням використання інноваційних систем та місцевих умов роботи, проте не надається достатньої уваги комплексному аналізу факторів несхоронності вантажів при перевезенні певним видом транспорту.

Проаналізувавши публікації українських науковців, виявлено, що в них за останні роки недостатньо уваги приділяється аналізу, розробленню та впровадженню сучасних інноваційних підходів до вирішення завдання суттєвого покращення забезпечення схоронності вантажів при перевезенні залізничним транспортом України.

З останніх публікацій слід відзначити напрацювання, направлені на зниження несхоронності певних вантажів та зниження їх впливу на довкілля при перевезенні залізничним транспортом. Так, авторами [7] було запропоновано підхід до формування математичної моделі та спосіб її розв’язання, який відповідає за раціональну організацію вантажних поїздів з небезпечними вантажами на сортувальних станціях. Однак слід зазначити складність формування цієї моделі, оскільки однією з її складових є величина ризику, яка, як правило, заснована на обробці статистичних даних. Для адекватного функціонування запропонованої технології в експлуатаційному режимі цей підхід не є ефективним.

У роботі [8] була розроблена трирівнева система індексації запобігання ризиків при транспортуванні небезпечних вантажів залізницею. У поєднанні з характеристиками кожного показника та поточною ситуацією в управлінні безпекою транспортного процесу суб'єктивний та об'єктивний методи аналізу та підбору комбінації були інтегровані в динамічну модель запобігання ризику залізничного транспорту під час перевезення небезпечних вантажів.

В наведених роботах розроблені потужні інструменти для оцінювання, запобігання та мінімізації ризиків при перевезенні небезпечних вантажів залізницею. Однак слід зазначити, що жоден з авторів не мав на меті реалізацію системного підходу до завдання дослідження схоронності вантажу, можливості виявлення домінантних факторів, що мають значення для перевізного процесу, для

оптимізації технологічного процесу організації перевезення.

Аналіз описання факторів, які впливають на схоронність вантажу, показав відсутність універсального, узагальненого переліку факторів та класифікації з описанням причинно-наслідкових зв`язків при перевезенні залізничним транспортом.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – дослідження стану несхоронних перевезень на залізничному транспорті України. Завданням є аналіз факторів, що впливають на несхоронність вантажу, шляхом їх класифікації за ступенем керованості та формулювання сучасного погляду на складові несхоронності вантажу при транспортуванні залізничним транспортом з урахуванням реалій перевізного процесу та перспектив реструктуризації галузі.

Основна частина дослідження. При транспортуванні вантажів залізничним транспортом вантажовласники постійно зазнають збитків, особливо значних – від розкрадань. Якість виконання технології охорони вантажів, коли вони перебувають в парках станцій або транспортуються до місця призначення, залежить від багатьох взаємозалежних факторів. Для забезпечення якісної технології охорони вантажів проти розкрадань при перевезенні необхідно поєднувати всі взаємопов'язані процеси: надання повної інформації клієнтам про можливі варіанти виконання охорони вантажів, технічне забезпечення якості охорони вантажів, попередження скоєння протиправних дій.

Одним з прикладів сторонніх втручань може слугувати ситуація в регіональній філії «Придніпровська залізниця». За вісім місяців 2019 року працівники воєнізованої охорони регіональної філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця» припинили 568 розкрадань залізничного майна та вантажів на загальну суму майже 3,5 млн грн, за протизаконні дії затримали 521 зловмисника [9].

Близько 40 % злочинних спроб (221 випадок) становили зазіхання на вантажі, які перевозить залізничний транспорт. Найчастіше розкрадачів цікавили вугілля, брухт, метал чи металопродукція. Діаграми попереджених крадіжок наведено на рис. 1.

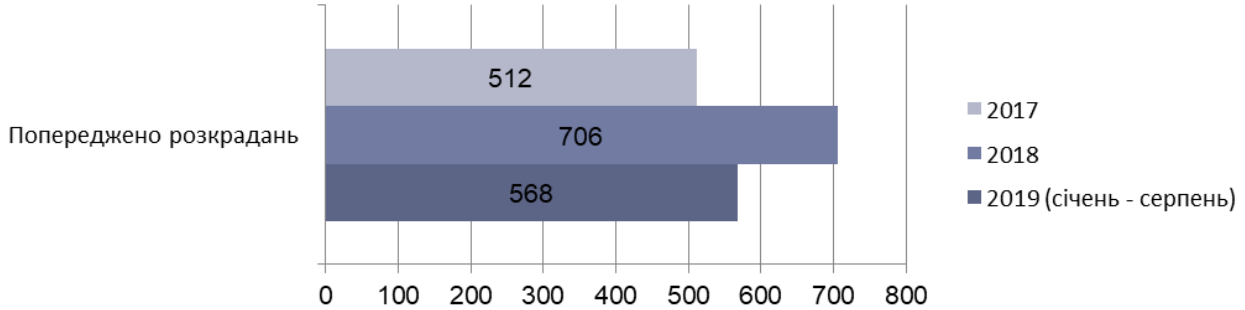
У країнах Європи та СНД використовуються сучасні заходи для забезпечення схоронності вантажів. Так, наприклад, ефективно ведеться спостереження за збереженням майна ВАТ «РЖД» та вантажів, що при перевезенні знаходяться у парках залізничних станцій. У Німеччині, Бельгії та інших країнах Європи для запобігання крадіжок на залізницях поряд з відеонаглядом застосовується огородження парків станцій, перегонів тощо.

Аналіз зарубіжних джерел вказує, що на сьогодні обґрунтованими та ефективними у використанні [10, 11] є такі сучасні технічні засоби:

- огородження території складів, вантажних районів, парків або станцій в цілому, що унеможливлює потрапляння сторонніх осіб;
- відеоспостереження із механізмом повороту на 180^0 (360^0) у вантажних районах, сортувальних та приймально-відправних парках станцій, що надає можливість на проведення цілодобового контролю;
- відеоспостереження, яке встановлюється безпосередньо на рухомий склад (РС) для отримання чітких знімків крадіїв та навколишньої території, де може знаходитись транспортний засіб злочинців;
- зчитуючі пристрої RFID-системи, що надають можливість зчитування інформації з RFID-міток про час несанкціонованого зняття ЗПП;
- пломби (ЗПП) із GPS-навігацією, що надають можливість простеження місцезнаходження РС на шляху прямування та передачі даних з датчика на розрив;
- GPS-навігація вагонів, що надає можливість відстеження місцезнаходження

вагонів у режимі «on-line» та виключення їх несанкціонованого переміщення в межах станції;

- БПЛА (дрони), що надають можливість моніторингу ситуації з повітря, незалежно від атмосферних умов.



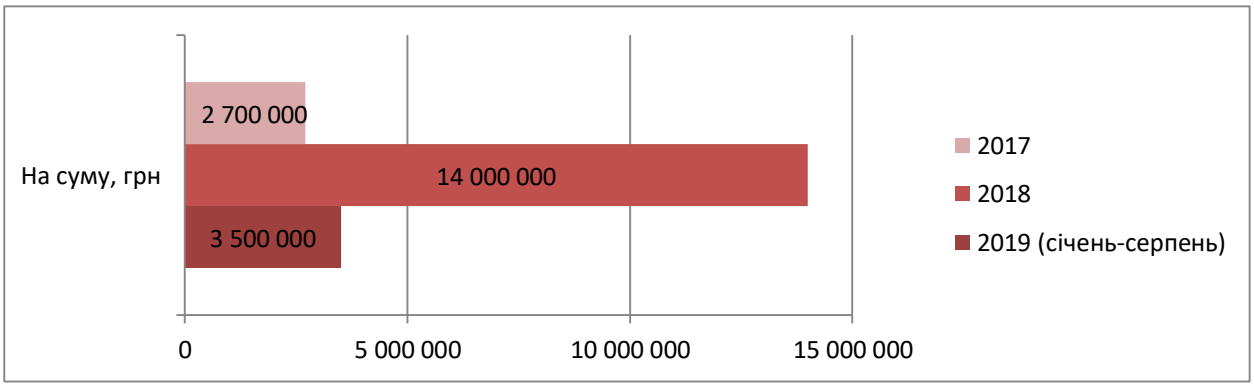


Рис. 1. Діаграми попереджених крадіжок за 8 місяців 2019 року порівняно з 2017 і 2018 роками (Регіональна філія «Придніпровська залізниця»)

Несхоронність вантажу виявляється, як правило, при його вивантаженні у пункті прибуття. Відповідальність за несхоронність вантажу не завжди покладається на перевізника, а лише у випадку наявності його вини. Під несхоронністю вантажу розуміють убуток, нестачу, пошкодження та псування вантажу, що характеризується втратою вантажем своїх кількісних (крім природних втрат) і якісних характеристик. Процес попереднього визначення ризику несхоронності вантажу шляхом виявлення та оцінювання домінантних факторів є досить важливим для прийняття рішень в питаннях планування, організації та управління перевізним процесом з урахуванням прийнятого рівня ризику.

На базі описання природи несхоронності вантажу виявлено фактори, які впливають на схоронність вантажу та класифіковані на керовані (в першу чергу, з точки зору організації перевізного процесу) та некеровані (рис. 2).

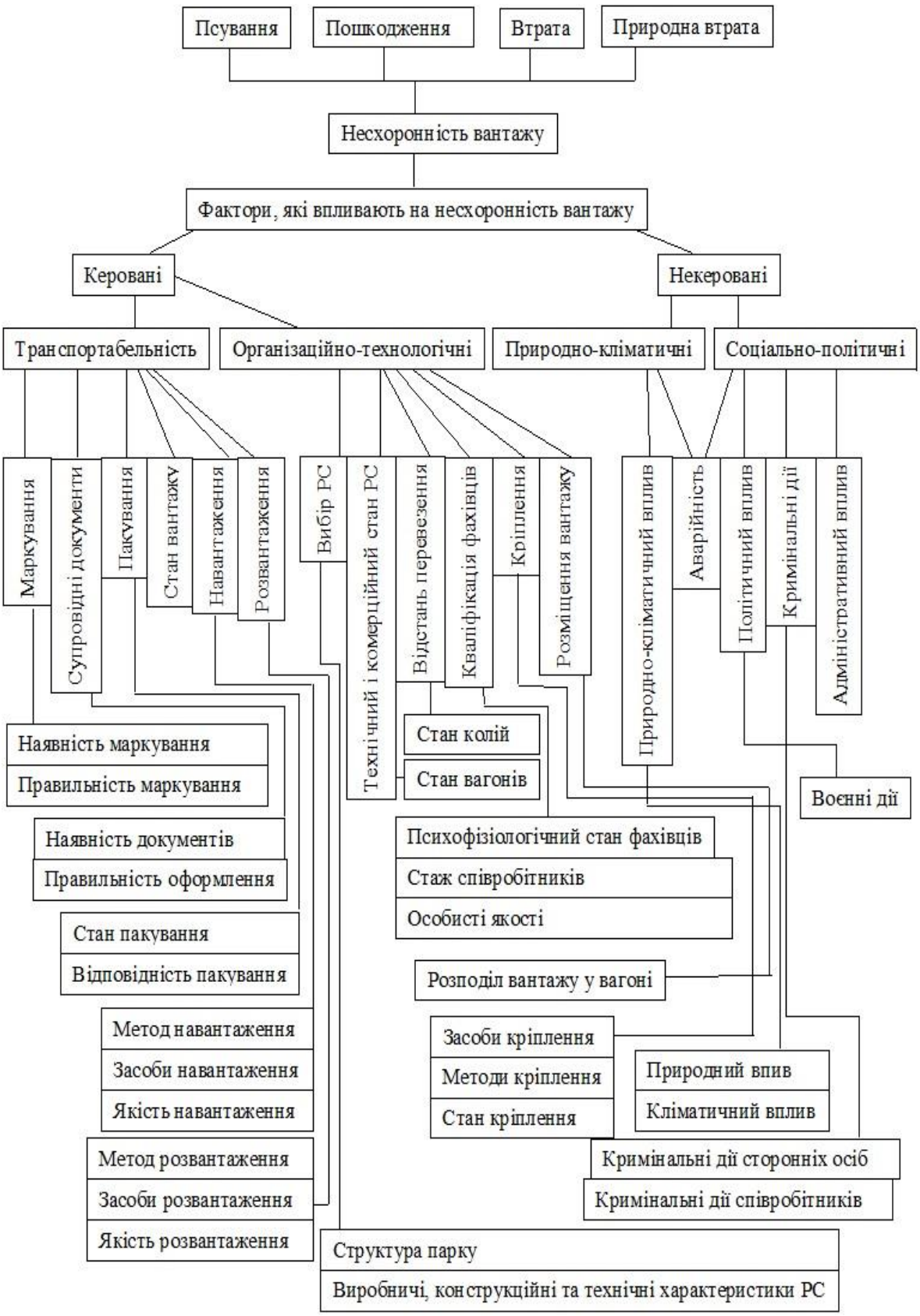


Рис. 2. Структурно-логічна схема факторів, що впливають на збереження вантажу при перевезенні залізничним транспортом

Наведені фактори несхоронності вантажу в ланцюзі поставки мають відповідну специфіку впливу на вантаж з урахуванням особливості функціонування усіх ланок ланцюга поставок. Однак при цьому система доставки продукції має бути організована таким чином, щоб загальні втрати (несхоронність) вантажу при виконанні доставки продукції кінцевому споживачу прагнули до мінімального рівня. Тобто цільову функцію, яка враховує вимоги всіх учасників ланцюга поставок, можна уявити в такому вигляді:

$$B_{заг} = B_{зс} + B_{врр} + B_{тр} + B_{с} \to \min; \quad (1)$$

де $B_{зс}$ – несхоронність продукції при зберіганні на складі, грн/т;

$B_{врр}$ – несхоронність продукції (вантажу) при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт, грн/т;

$B_{тр}$ – несхоронність вантажу при транспортуванні (в т. ч. залізничним транспортом), грн/т;

$B_{с}$ – несхоронність вантажу (продукції) від дії сторонніх осіб та кримінальних дій співробітників, грн/т.

Розглянемо більш детально складову несхоронності вантажу при транспортуванні залізничним транспортом з урахуванням реалій перевізного процесу та перспектив реструктуризації галузі (виділення оператора залізничної інфраструктури, операторів тяги і вагонних операторів). Загалом цільова функція матиме вигляд

$$B_{тр} = B_{інфр} + B_{т} + B_{в} \to \min; \quad (2)$$

за таких обмежень

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} Q_i = Q_{заг}; \\ \sum_{y=1}^{z} Г_y \geq Г_{дост}; \\ \sum_{j=1}^{m} M_j \geq M_{дост}; \\ \sum_{x=1}^{к} n_x \geq n_{дост}, \end{cases} \quad (3)$$

де $B_{інфр}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана зі станом інфраструктури та діями працівників інфраструктурних підрозділів під час перевезення вантажу, грн/т;

$B_{т}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з тягою поїздів (перевезенням, переміщенням) та діями працівників тягових підрозділів під час перевезення вантажу, грн/т;

$B_{в}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з рухомим складом для перевезення вантажу та діями працівників вагонних операторів під час перевезення вантажу, грн/т;

$Q_i, Q_{заг}$ – відповідно обсяг перевезення *i*-го вантажу та загальний обсяг перевезення вантажів залізничним транспортом, т;

$Г_y, Г_{дост}$ – відповідно провізна спроможність *y*-го напрямку та достатня загальна провізна спроможність залізниць, т нетто/рік;

$M_j, M_{дост}$ – відповідно робочий парк поїзних локомотивів *j*-го типу різних операторів тяги та достатній парк справних поїзних локомотивів з правом виходу на колії загального користування (оператора залізничної інфраструктури), од.;

$n_x, n_{дост}$ – відповідно робочий парк рухомого складу *j*-го типу різних вагонних операторів та достатній парк придатних вагонів з правом виходу на колії загального користування (оператора залізничної інфраструктури), од.

Кожна складова формули (2) має інтерпретацію стосовно оператора перевізного процесу залізничного транспорту (інфраструктури, тяги або рухомого складу), а саме

$$B_{інф} = B_{пр} + B_{пко} + p_i B_v + B_{нінф} \to \min; \quad (4)$$

де $B_{пр}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з якістю контролю при прийманні вантажу до перевезення, грн/т;

$B_{пко}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з якістю контролю на шляху прямування вантажу (робота пунктів комерційного огляду поїздів і вагонів), грн/т;

$p_i B_v$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з невиконанням нормативної швидкості доставки вантажу, з вини оператора залізничної інфраструктури, грн/т;

p_i – частка несхоронності вантажу, яка пов`язана з невиконанням нормативної швидкості доставки вантажу, з вини оператора залізничної інфраструктури;

B_v – несхоронність вантажу, яка пов`язана з невиконанням нормативної швидкості доставки вантажу, грн/т;

$B_{нінф}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з недостатньою кваліфікацією або станом працівників оператора інфраструктури, грн/т;

$$B_m = p_m B_v + B_{нт} \to \min; \quad (5)$$

де $p_m B_v$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з невиконанням нормативної швидкості доставки вантажу, з вини оператора тяги, грн/т;

p_m – частка несхоронності вантажу, яка пов`язана з невиконанням нормативної швидкості доставки вантажу, з вини оператора тяги;

$B_{нт}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з недостатньою кваліфікацією або станом працівників оператора тяги, грн/т;

$$B_в = B_{срс} + B_{ох} + B_{нв} \to \min; \quad (6)$$

де $B_{срс}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана зі станом та якістю підготовки рухомого складу до перевезення конкретного вантажу, грн/т;

$B_{ох}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з якістю охорони та супроводження вантажу при перевезенні (воєнізована охорона, супровід провідників), грн/т;

$B_{нв}$ – несхоронність вантажу, яка пов`язана з недостатньою кваліфікацією або станом працівників оператора вагонів, грн/т.

У відношенні некерованих з боку магістрального залізничного транспорту факторів необхідні процедури об’єктивного звіту, які дозволяють нівелювати їх вплив. Фактори внутрішнього середовища необхідно оцінювати на етапі планування.

Важливим для забезпечення схоронності вантажів при перевезенні залізничним транспортом є розроблення і впровадження нормативно-технічної документації, спрямованої на скорочення втрат вантажів, та здійснення контролю її виконання, а також підвищення відповідальності працівників за несхоронні

перевезення вантажів, навчання, підвищення кваліфікації та інструктаж осіб, пов'язаних з перевізним процесом.

Щоб забезпечити схоронність залізничного майна та вантажів, працівники ВОХР регулярно патрулюють найбільш криміногенні перегони й станції, об'єкти, які привертають увагу розкрадачів; супроводжують вантажні поїзди, оперативно реагують на повідомлення про несанкціоновані втручання в роботу залізниці.

Огородження територій складів, вантажних районів, парків або станцій допомагає працівникам станції підтримувати контроль за технікою безпеки, контролювати цілісність вагонів та збереження вантажів із товарно-матеріальними цінностями залізничних підприємств, унеможливлюючи потрапляння сторонніх осіб з метою скоєння протиправних дій. Так, у 2019 році було влаштовано понад 70 м паркану на станції Ігрень. Більше 300 м огорожі з'явилося на станції Кривий Ріг-Головний, а також установлять огорожу на ще одній станції регіону – Кривий Ріг.

Залізобетонні плити перекриють несанкціоновані проходи, що перетинають колії в місцях інтенсивного залізничного руху; обмежать доступ у зони проведення маневрових та інших потенційно небезпечних для сторонніх осіб робіт [12].

На сьогодні країнами Європи та СНД використовуються такі сучасні технології, як відеонагляд у поєднанні з огородженням парків станцій, складів, перегонів, ЗПП із GPS-навігацією та GPS-навігація вагонів, БПЛА (тобто дрони).

Оснащення сортувальних і приймально-відправних парків відеоспостереженням дозволить постійно слідкувати за переміщенням на території і контролювати схоронність вантажів та майна залізниць. Ще одним із засобів контролю є система відеоспостереження, яка встановлюється безпосередньо на вагони. При використанні такого відеоспостереження здійснюється нагляд за рухомим складом та сигналізування про втручання в цілісність вантажу у вагоні з одержанням картинки вагона, чітких знімків зловмисників та навколишньої території, де може стояти транспортний засіб крадіїв.

RFID-технологія – це радіочастотне розпізнавання за допомогою закріплених за об'єктом спеціальних міток, що несуть інформацію. Це обладнання є ефективним інструментом для створення систем спостереження за вантажними вагонами і в той самий час за їх складовими частинами, наприклад, колісними парами [13].

Висновки. Таким чином, на основі дослідження стану несхоронних перевезень залізницями України проведено аналіз факторів, які впливають на несхоронність вантажів при перевезенні залізничним транспортом, та запропоновано відповідну класифікацію цих факторів за ступенем керованості (керовані, некеровані з боку перевізника) і спрямованістю (транспортабельність, організаційно-технологічні, природно-кліматичні та соціально-політичні).

Структурно-логічна схема факторів, що впливають на збереження вантажу при перевезенні залізничним транспортом України, використана при формулюванні цільової функції мінімізації несхоронності вантажу в ланцюзі поставки в частині перевезення залізничним транспортом України з урахуванням реалій перевізного процесу та перспектив реструктуризації галузі. Фактори, що визначають вірогідність несхоронності вантажу, проявляються спонтанно і події носять випадковий характер.

Подальшим розвитком дослідження має стати розроблення механізму формування комплексної оцінки ризику несхоронності вантажу при перевезенні залізничним транспортом, в т. ч. формалізація ризиків несхоронності вантажу для можливості реалізації стратегії превентивного управління ризиками.

Список використаних джерел

1. Кузнецов М. М. Забезпечення безпеки руху і схоронності вантажів на залізницях. *Залізничний транспорт України*. 2005. №3/1. С. 19.

2. Ломотько Д. В., Кузнецов М. М., Пилипейко О. М. Підвищення рівня схоронності вантажів, що перевозять по залізницях України. Наука в транспортном измерении. Київ : ДНДЦ УЗ, 2006. С. 67.

3. Прадед Н. Н. Причины и условия, способствующие совершению хищений специальным субъектом на объектах железнодорожного транспорта. Сборник статей IV Международной заочной научно-практической конференции «Наука вчера, сегодня, завтра» (Россия, г. Новосибирск, 18 сентября 2013 г.). URL: http://sibac.info/sibac.info/10259/ (дата звернення: 11.10.2019).

4. Запара Я. В. Аналіз стану технології охорони вантажів на залізницях України. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. 2013. Вип. 142. С. 32 - 37.

5. Запара Я. В., Запара В. М. Стан та перспективи забезпечення збереження вантажів залізницями України. Сборник научных трудов SWorld. Иваново: МАРКОВА АД, 2014. № 3(36). Т. 1. С. 60 - 64.

6. Запара Я. В., Гарбузов М. В., Фасішевська М. С. Шляхи вирішення проблеми втручання сторонніх осіб у діяльність залізничного транспорту. Тези доповідей за матеріалами 78-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (17-18 травня 2018 р.). Дніпро: ДНУЗТ, 2018. С. 141-142.

7. Lavrukhin O., Kovalov A., Kulova D., Panchenko A. Formation of a model for the rational placement of cars with dangerous goods in a freight train. Procedia Computer Science. 2019. Vol. 149. P. 28–35.

8. Luan T., Guo Z., Pang L. Early Warning Model for Risks in Railway Transportation of Dangerous Goods Based on Combination Weight. Tiedao Xuebao journal of the China Railway Society, 2017. 39 (12). P. 1-7.

9. Воєнізована охорона Придніпровської залізниці вберегла від зловмисників майна та вантажів на суму майже 3,5 млн гривень. URL: https://dp.uz.gov.ua/ukr/news/?id=3926 (дата звернення: 11.10.2019).

10. Атака дронів або безпілотні сторожі. Магистраль. URL: http://www.magistral-uz.com.ua/articles/ataka-droniv-abo-bezpilotni-storozhi/ (дата звернення: 11.10.2019).

11. Ограждения вдоль железнодорожного полотна установили на двух станциях в Удмуртии. URL: http://www.izvestiaur.ru/news/view/6422501.html/ (дата звернення: 11.10.2019).

12. Залізничники огороджують небезпечні місця на станціях Кривий Ріг – Головний. URL: https://rudana.com.ua/news/zaliznychnyky-ogorodzhuyut-nebezpechni-miscya-na-stanciyah-kryvyy-rig-golovnyy-ta-chervona?page=37 (дата звернення: 11.10.2019).

13. Лаврухін О. В., Запара В. М., Запара Я. В., Кравець А. Л. Вантажознавство та схоронність вантажів: навч. посібник. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 178 с.

Запара Віктор Мефодійович, канд. техн. наук, професор кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.
E-mail: v.zapara@gmail.com.
Запара Ярослав Вікторович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-85.
E-mail: y.zapara@gmail.com.
Хворостянна Яна Олексіївна, магістрант групи 11-Ім-ТТ Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: yanaprost075@gmail.com.

Лейба Інна Олександрівна, магістрант групи 11-ІІм-ТТ Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: innaleiba1402@gmail.com.

Zapara Victor, PhD (Tech.), Professor, Department of Management of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-85. E-mail: v.zapara@gmail.com.
ZaparaYaroslav, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Management of Freight and Commercial Work, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-85. E-mail: y.zapara@gmail.com.
Khvorostianna Yana, Master, Group 11-IIm-TT, Ukrainian State University of Railway.
E-mail: yanaprost075@gmail.com.
Leiba Inna, Master, Group 11-IIm-TT, Ukrainian State University of Railway. E-mail: innaleiba1402@gmail.com.

Статтю прийнято 20.11.2019 р.

УДК 656.2

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАНУВАННЯ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ОСНОВІ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Д-р техн. наук Т. В. Бутько, кандидати техн. наук О. М. Костєнніков, В. М. Прохоров, асист. О. О. Шапатіна

DEVELOPMENT OF AUTOMATED TECHNOLOGY FOR PLANNING OF INTERMODAL TRANSPORTATIONS ON THE BASISOF MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION

D. Sc. (Tech.) T. Butko, PhD (Tech.) O. Kostiennikov, PhD (Tech.) V. Prokhorov, O. Shapatina

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.188.2019.206202

Підвищення якості планування інтермодальних перевезень – одне з основних завдань не лише на шляху розвитку експортного і транзитного потенціалу України, але також є не менш важливим для підвищення конкурентоспроможності системи вантажних залізничних перевезень в державі. Але щоб інтермодальні оператори та разом із ними і вантажовідправники змогли скористатися всіма перевагами залізничного транспорту, необхідне впровадження сучасної технології планування інтермодальних перевезень. Дана технологія має забезпечувати урахування можливих затримок у пунктах зміни виду транспорту та на лініях в динаміці, залежно від моменту часу прибуття вантажу до даного пункту маршруту, а також визначати оптимальний маршрут не лише за критерієм витрат, але й за критерієм тривалості перевезення. Для вирішення цього завдання було розроблено багатоцільову математичну модель і запропоновано оригінальний метод її оптимізації.

Ключові слова: *інтермодальні контейнерні перевезення, генетичний алгоритм, метод зваженої стрес-функції.*

Improving the quality of intermodal transportation planning is one of the main tasks not only in the way of development of export and transit potential of Ukraine, but it is also equally important for improving the competitiveness of the freight rail transportation system in the country. This fact is due to the fact that Ukraine has a large area and at the same time developed railway infrastructure, and therefore the rail transport is one of the most likely candidates for the choice of

a container for land transportation, and also the railway tariffs are much lower than the automobile ones. A significant drawback of rail transport compared to road transport is the possibility of long delays in trains and container overloading points. Therefore, in order for intermodal operators and, together with them, consignors to be able to take full advantage of rail transport, it is necessary to introduce modern intermodal transportation planning technology. One of the important tasks that must be solved with the introduction of this technology is the ability to route the route based on the time domain. This operational scheduling technology should allow for possible delays at the points of change of transport and on lines in the dynamics, depending on the time of arrival of the cargo to this point of the route. In addition, this technology should allow to determine the optimal not only on the criterion of cost, but also the criterion of the duration of transportation. This condition is important to ensure a modern level of customer service. To solve this problem, a multipurpose mathematical model was developed and an original method of its optimization was proposed, which involves the use of a special genetic algorithm to find the set of Pareto-optimal solutions and the weighted stress function method to identify a single final solution. According to the results of modeling, which was carried out using specially developed software, this model and method was proposed as a basis for the formation of automated technology for planning intermodal transportation.

Keywords: *intermodal container transportation, genetic algorithm, weighted stress function method.*

Вступ. Контейнерні перевезення є основним компонентом інтермодальних перевезень та міжнародної торгівлі. Інтермодальні перевезення здійснюються з залученням двох або більше видів транспорту. Їх специфіка полягає також і в тому, що вантаж протягом всього шляху знаходиться у складі однієї і тієї самої транспортної одиниці, наприклад, контейнера, а перевезення здійснюється за єдиним транспортним документом та під контролем єдиного оператора. За таких умов вантажовідправник не повинен укладати окремих договорів із транспортними підприємствами та особисто контролювати всі ланки перевезення, наприклад, складні процеси перевантаження контейнерів, узгодження розкладів тощо. Така зручність є важливим фактором, який забезпечує даному виду перевезень постійний приплив нових клієнтів, особливо зважаючи на те, що оператори також здійснюють контроль митних операцій при перетині міждержавних кордонів. Інтермодальні перевезення є також «рятувальним кругом» і для залізничної галузі України, адже її територією проходять декілька міжнародних транспортних коридорів. Однак для підвищення конкурентоспроможності і привабливості інтермодальних перевезень необхідно зробити їх максимально зручними для клієнтів за рахунок максимального наближення останніх до процесу планування. Одним з першочергових завдань є завдання оперативного планування перевезення, в результаті вирішення якого буде визначатись маршрут з урахуванням не лише довжини сегментів, що відповідають різним видам транспорту, а й фактора часу. Мета застосування даного підходу полягає у забезпеченні підвищення точності урахування часів затримок під час передачі вантажу від одного транспортного підприємства до іншого, а також забезпеченні можливості одночасного урахування вимог клієнта щодо вартості перевезення та терміну доставки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття [1] присвячена вирішенню завдання визначення маршруту інтермодальних перевезень вантажів. Автор справедливо наголошує на необхідності врахування при його вирішенні декількох критеріїв. Далі, зазначаючи, що у такій

постановці дане завдання з точки зору обчислювальної складності є NP-важким, ним застосовуються методи декомпозиції для розбиття цього завдання на декілька підзавдань. Однак такий підхід нівелює сенс багатоцільової оптимізації. У роботі [2] вирішується завдання визначення маршруту контейнерних перевезень на основі одночасної оптимізації витрат вузлових і лінійних інтермодальних операторів, однак критерій тривалості перевезення не враховано. У статті [3] досліджується вплив тарифів залізничних компаній на конкурентоспроможність маршрутів інтермодальних перевезень, але жодної математичної моделі не запропоновано. У роботі [4] визначаються методи оцінювання і стратегічного вибору маршрутів інтермодальних перевезень із залученням залізничного транспорту в напрямку Китай–Європа за критерієм впливу на навколишнє середовище з огляду на обсяг викидів вуглекислого газу, але критерію часу доставки вантажів не приділено уваги. У статті [5] запропоновано модель для підвищення комерційної ефективності використання маршрутів інтермодальних контейнерних перевезень із застосуванням залізничного і морського транспорту за рахунок введення тристадійної схеми продажу вільних слотів, однак модель не враховує імовірнісну природу попиту на перевезення. У роботі [6] запропоновано однокритеріальну модель вибору маршруту інтермодальних перевезень із залученням залізничних і морських перевізників на основі критерію витрати палива, однак інші важливі критерії таких перевезень залишились поза увагою.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення моделі планування інтермодальних контейнерних перевезень, яка спрямована на максимальне задоволення вимог вантажовідправників за рахунок одночасного врахування при визначенні маршруту таких параметрів перевезення, як вартість транспортування і термін доставки вантажу.

Основна частина дослідження. Одним із критеріїв при плануванні інтермодального перевезення є його вартість. Цільову функцію доцільно сформувати у вигляді витрат, які припадають на один контейнер:

$$C\left(X,t_0\right)=\left(e_{док}+n\sum_{i=1}^{\#X}\left(L_{x_i}e_{x_i}+\left(e_{x_i}^{\partial_1}+e_{x_i}^{\partial_2}\right)+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\theta\left(\left|m_{x_i}-m_{x_{i+1}}\right|\right)\left(e_{s_{x_i}^{кінц},s_{x_{i+1}}^{поч}}+\left(e_{s_{x_{i+1}}^{поч}}^{скл}+\chi e_{s_{x_{i+1}}^{поч}}^{ох}\right)\tau_{s_{x_i}^{кінц},s_{x_{i+1}}^{поч}}^{пер}\left(t_0\right)\right)\right)\right)/n\to\min, \quad (1)$$

де X – впорядкований змінний вектор (множина) номерів дуг, що відповідає маршруту переміщення вантажу на графі; $e_{док}$ – витрати на оформлення перевізних документів; n – обсяг партії вантажу, приведений до 20-футових контейнерів (TEU); $\#X$ – потужність множини елементів змінного вектора X; L_{x_i} – довжина дільниці маршруту, що відповідає i-му елементу множини x; e_{x_i} – питомі витрати на переміщення контейнера на дільниці, що відповідає дузі x_i; $e_{x_i}^{\partial_1}$ – додаткові витрати на дузі x_i, що пов'язані з вантажем (плата за додаткове кріплення, плата за перевантаження тощо); $e_{x_i}^{\partial_2}$ –

додаткові витрати на дузі x_i, що пов'язані зі специфікою просування транспортного засобу (судовий збір, плата за льодову проводку судна, сезонна надбавка до тарифу); $e_{s_{x_i}^{кінц}}, e_{s_{x_{i+1}}^{поч}}$ – питомі витрати, що пов'язані з вивантаженням контейнера на кінцевому терміналі дуги x_i, переміщенням та навантаженням на терміналі дуги x_{i+1}; $e^{скл}_{s_{x_{i+1}}^{поч}}$ – вартість зберігання на складі терміналу, який розташований на початковій вершині дуги x_{i+1}, під час очікування навантаження; $e^{ох}_{s_{x_{i+1}}^{поч}}$ – питома вартість охорони контейнера на складі терміналу, який розташований на початковій вершині дуги x_{i+1}, під час очікування; χ – булева змінна, що приймає значення 1, якщо охорона необхідна, та 0 – в іншому випадку; m_{x_i} – вид транспортного сполучення на дузі x_i; $\tau^{пер}_{s_{x_i}^2, s_{x_{i+1}}^1}(t_0)$ – часовий інтервал затримки при переході між дугами x_i та x_{i+1} (при зміні одного виду транспорту на інший або при виконанні операцій із поїздами на залізничних станціях, митних операцій тощо), який залежить від моменту початку реалізації маршруту t_0; $\theta(x)$ – функція Гевісайда, яка визначена таким чином:

$$\theta(x) = \begin{cases} -1 & , якщо\ x < 0 \\ 0 & , якщо\ x \le 0 \\ 1 & , якщо\ x > 0 \end{cases}. \qquad (2)$$

Ще одним важливим критерієм є час доставки вантажу. Його можна подати у вигляді цільової функції

$$T(X, t_0) = \sum_{i=1}^{\#X} \left(\frac{L_{x_i}}{V_{x_i}} k_{x_i}^{зат}(t_0) + \tau^{пер}_{s_{x_i}^{кінц}, s_{x_{i+1}}^{поч}}(t_0) \right) \to \min, \qquad (3)$$

де V_{x_i} – середня швидкість переміщення по дузі x_i;

$k_{x_i}^{зат}(t_0)$ – коефіцієнт затримки при переміщенні по дузі x_i, який залежить від моменту початку реалізації маршруту t_0.

До того ж для отримання адекватного рішення на керуючі змінні моделі накладаються певні обмеження:

$$\begin{cases} t^{лм} \le t_0 \le t^{пм} \\ s_{x_i}^{кінц} = s_{x_{i+1}}^{поч} \quad , i = 1, 2 \ldots \# X \\ s_{x_1}^{поч} = s^{поч} \\ s_{x_{\# X}}^{кінц} = s^{кінц} \\ n \le w_{x_i}(t_0) \quad , i = 1, 2 \ldots \# X \end{cases}, \qquad (4)$$

де $t^{лм}$ та $t^{пм}$ – ліва та права межі інтервалу можливого початку реалізації маршруту, визначені вантажовідправником; $s^{поч}$ та $s^{кінц}$ – номери вершин графа транспортної мережі, які відповідають

початковому і кінцевому пунктам маршруту відповідно; $s_{x_i}^{кінц}$ та $s_{x_{i+1}}^{поч}$ – номер кінцевої вершини дуги x_i та номер початкової вершини дуги x_{i+1} відповідно; $s_{x_1}^{поч}$ та $s_{x_{\# X}}^{кінц}$ – номер початкової вершини першої дуги маршруту та номер кінцевої вершини останньої дуги маршруту відповідно; $w_{x_i}\left(t_0\right)$ – кількість вільних контейнеро-місць (слотів на борту контейнеровоза або фітингових платформ для навантаження контейнерів) на момент початку переміщення вантажу по дузі x_i залежно від моменту початку реалізації маршруту t_0 .

Перше обмеження забезпечує пошук рішення, момент початку реалізації маршруту якого знаходиться в межах певного часового інтервалу, який відповідає умовам вантажовідправника. Друге обмеження забезпечує цілісність маршруту, контролюючи співпадіння кінцевої вершини попередньої дуги та початкової вершини наступної дуги. Третє та четверте обмеження забезпечують відбір тільки тих варіантів маршрутів, які сполучають вершини транспортної мережі, які визначені вантажовідправником як початковий і кінцевий пункти переміщення вантажу. П’яте обмеження забезпечує вибір лише тих маршрутів, які забезпечують наявність достатньої кількості вільних контейнеромісць для забезпечення можливості переміщення партії вантажу в повному обсязі по всіх ділянках маршруту.

Таким чином, у такій постановці завдання вибору оптимального плану мультимодального перевезення є завданням багатоцільової або векторної оптимізації.

Вирішення завдань векторної оптимізації є не лише концептуально, але й технічно більш складним процесом у порівнянні із завданнями, які використовують тільки один критерій. Концептуальна складність полягає в тому, що в загальному випадку не існує єдиного рішення, яке б одночасно відповідало мінімумам по всіх критеріях. Таким чином, вирішення завдання може бути лише компромісним, тобто таким, яке задовольняє певні вимоги або співвідношення між критеріями, або прагне до певного рівня балансу.

Отже, існує ціла множина «кращих» рішень, яка має назву множини Парето або Парето-фронту. Першим кроком вирішення такого завдання є відшукання по всій області можливих рішень множини рішень, що відповідають Парето-фронту. В цьому полягає технічна складність вирішення даного завдання, адже пошук множини точок Парето-фронту може в свою чергу являти собою значну обчислювальну складність, яка може зростати із більш ніж експоненційною швидкістю в порівнянні з лінійною швидкістю збільшення розмірності завдання.

З метою подолання цих труднощів запропоновано використання спеціального евристичного оптимізаційного алгоритму NSGA-III. Цей алгоритм відноситься до класу генетичних алгоритмів, тобто алгоритмів, які базуються на принципах збереження та покращення генофонду у живій природі. Даний алгоритм був спеціально розроблений для вирішення завдань багатоцільової оптимізації. Він створений у результаті подальшого розвитку алгоритму NSGA-II, і його основною відмінністю є новий механізм контролю локальної скупченості множини Парето-фронту, а саме оцінювання відстані скупченості було замінено оцінюванням щільності, яка визначається за допомогою опорних точок.

На першому кроці роботи алгоритму відбувається ініціалізація початкової популяції рішень $P=\left\{x_i\right\}_{i=1}^{N}$, а також множини опорних точок $R=\left\{r_i\right\}_{i=1}^{N}$. Кожна особина популяції являє собою

вектор змінних, який в термінології генетичних алгоритмів має назву «хромосома», а елемент вектора - «геном». Кожен ген містить номер дуги графа, яка була обрана для побудови маршруту. Останній ген хромосоми містить момент часу початку здійснення перевезення. На другому кроці алгоритму на основі поточної «батьківської» популяції генерується наступна популяція «нащадків» за допомогою генетичних операцій, таких як схрещування і мутація. На третьому кроці застосовується недоміноване сортування сукупної множини рішень $P \bigcup Q$ із виділенням з неї g недомінованих фронтів рішень $F_1, F_2 \ldots F_g$. На четвертому кроці, починаючи з фронту F_1, рішення копіюються до тимчасового архіву $\overline{P}$ до тих пір, поки його розмір не зрівняється або не перевищить значення N таким чином, що $\overline{P} = \bigcup_{i=1}^{k-1} F_i$. Якщо розмір популяції $\overline{P}$ дорівнює N, тоді місткість архіву використовується як нова популяція $P = \overline{P}$, і якщо умови зупинення роботи алгоритму не досягнуті (крок 7), то виконується наступний крок алгоритму. На п'ятому кроці виконується визначення величини скупченості по опорних точках множини R шляхом визначення прив'язки точок рішень до найближчої до них опорної точки. Під близькістю до опорної точки розуміється не безпосередня відстань до неї, а довжина перпендикуляра, опущеного на пряму, яка проходить через точку початку координат і відповідну опорну точку (рис. 1).

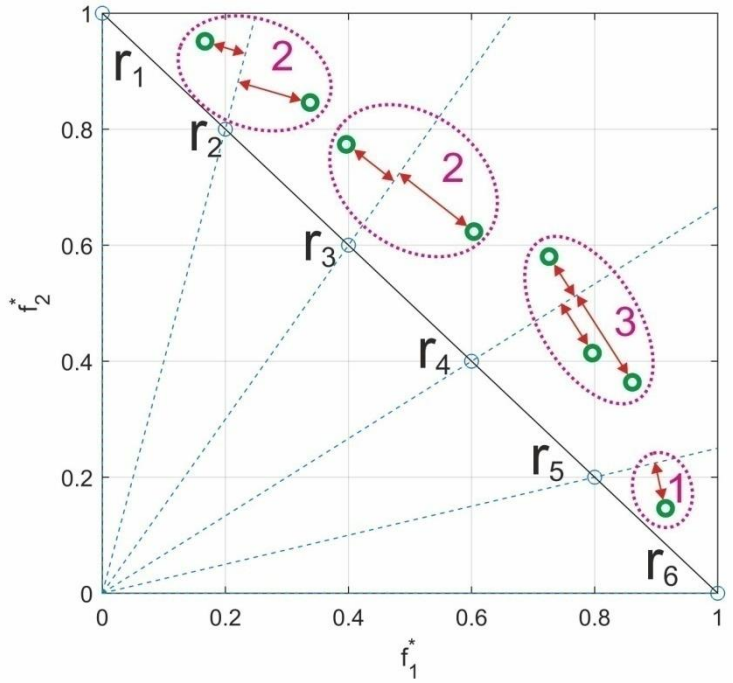


Рис. 1. Визначення величини щільності опорних точок

Таким чином, кількість точок рішень, які асоціюються з даною опорною точкою, називається її величиною щільності (рис. 1). Після обробки точок останнього фронту F_g і додавання їх до множини нової популяції P поточна величина щільності опорних точок перераховується. На шостому кроці відбувається випадковий

відбір точки рішення із підмножини рішень, які знаходяться в області опорної точки з найменшою величиною щільності до тих пір, поки чисельність популяції P не зрівняється з N. На сьомому кроці алгоритм виконує перевірку критеріїв зупинки, і якщо хоч один із них досягнуто, відбувається зупинка алгоритму і видача результату його роботи у вигляді Парето-фронту, який представлений фронтом F_1. Всі інші фронти відкидаються через те, що вони були допоміжними і використовувались лише для підтримання різноманіття популяції для запобігання потрапляння до локальних мінімумів. У випадку, якщо поточний стан алгоритму не відповідає жодному з критеріїв зупинки, алгоритм повторно продовжує виконання, починаючи з другого кроку.

На основі сформованої моделі було створено програмне забезпечення у середовищі Matlab. Як вихідні дані була використана абстрактна транспортна мережа, яка містить ділянки шляху, що відповідають чотирьом типам сполучення: автомобільному, залізничному, морському й авіаційному. Дана мережа подана орієнтованим графом, який наведено на рис. 2.

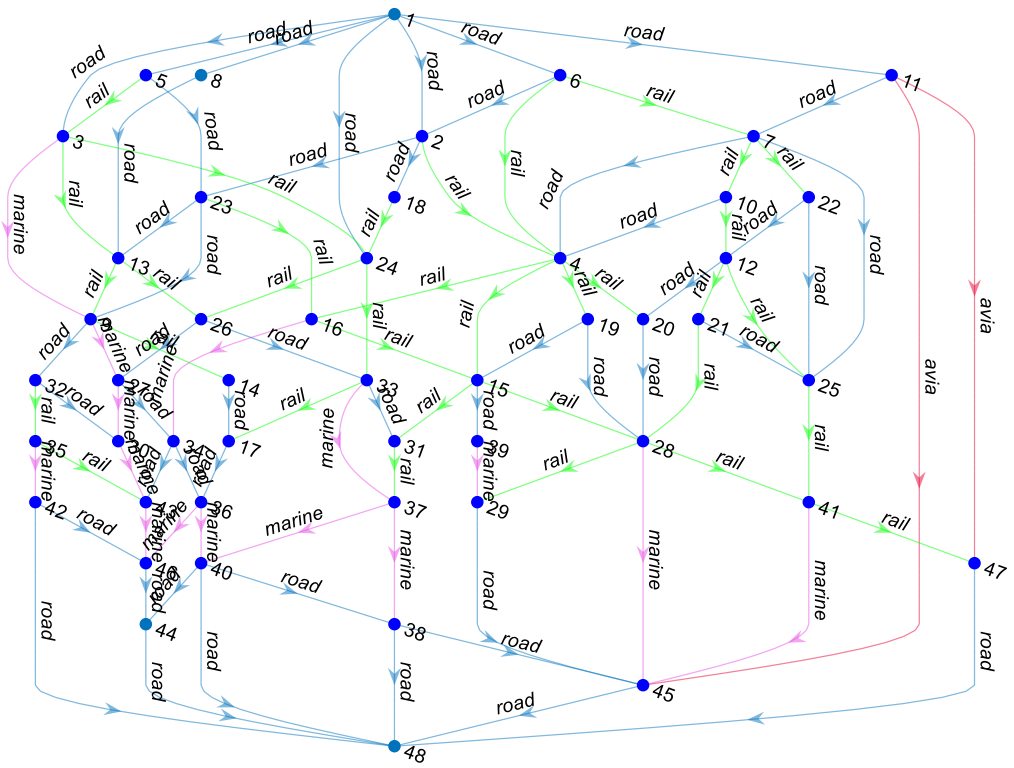


Рис. 2. Орграф транспортної мережі у завданні планування інтермодальних контейнерних перевезень

Параметрами дуги графа є вид сполучення, відстань, швидкість переміщення і вартість перевезення одного контейнера типу TEU на 1 км. У кожній вершині графа також визначені вартості перевантаження з одного виду транспорту на інший, що відповідають парам дуг, одна з яких представляє ділянку маршруту, по якій вантаж прибуває до даного пункту, друга дуга – ділянку, по якій вантаж відбуває від даної точки маршруту. Початкова точка кожної дуги також

асоціюється із розкладом затримок початку переміщення по даній дузі, який відповідає моменту часу потрапляння вантажу в ході реалізації перевезення до даного пункту.

Із застосуванням генетичного алгоритму типу NSGA-III було отримано множину Парето-оптимальних рішень, яка подана на рис. 3. На рис. 4 наведено результат ранжування популяції рішень у ході виконання алгоритму NSGA-III.

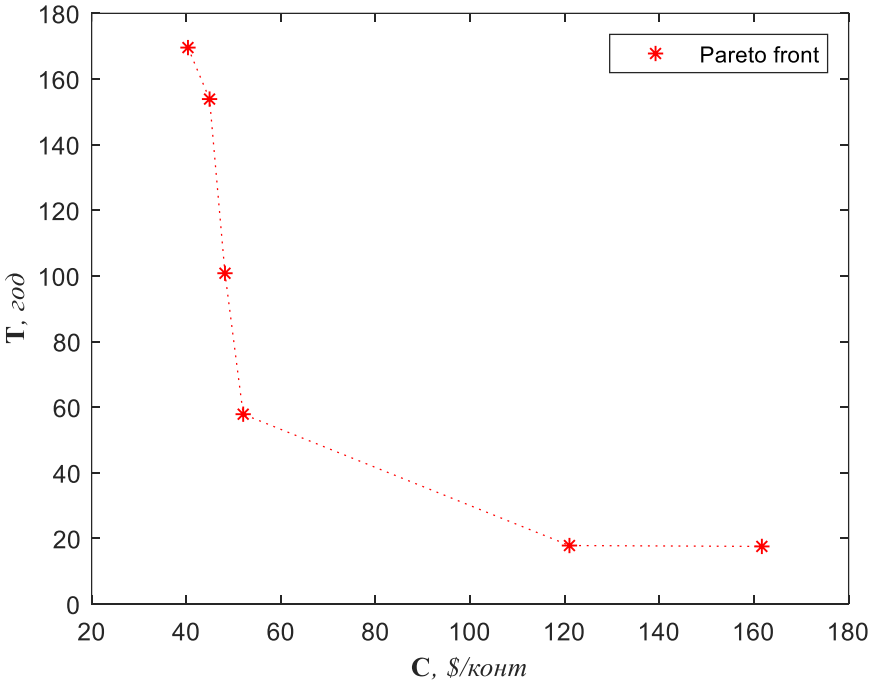


Рис. 3. Множина рішень Парето-фронту, отримана за допомогою алгоритму NSGA-III

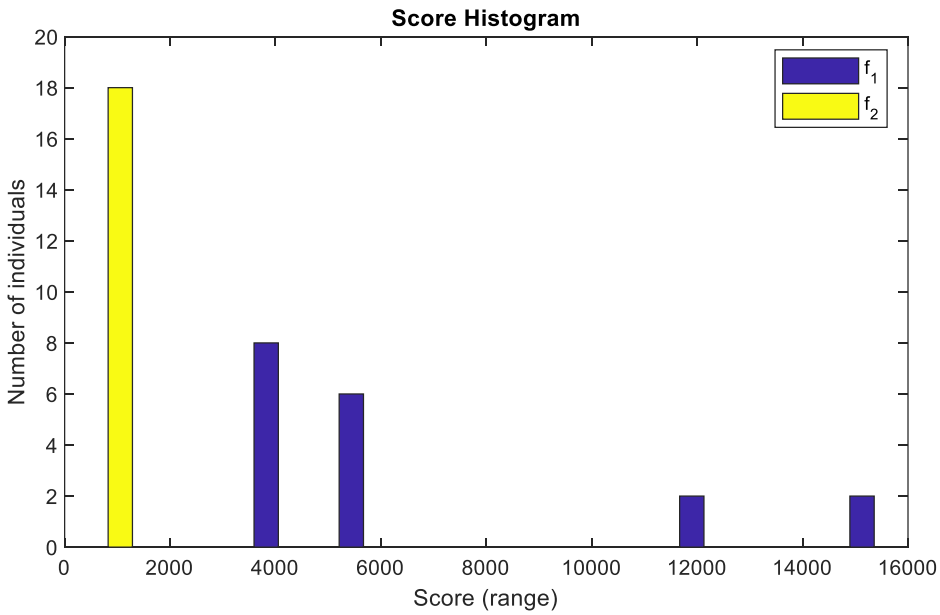


Рис. 4. Результат ранжування популяції рішень за значеннями компонентів цільових векторів у ході виконання алгоритму NSGA-III

Таким чином, множина Парето-оптимальних рішень включає шість цільових векторів (рис. 3). На рис. 5 наведено множину маршрутів, які відповідають даним цільовим векторам.

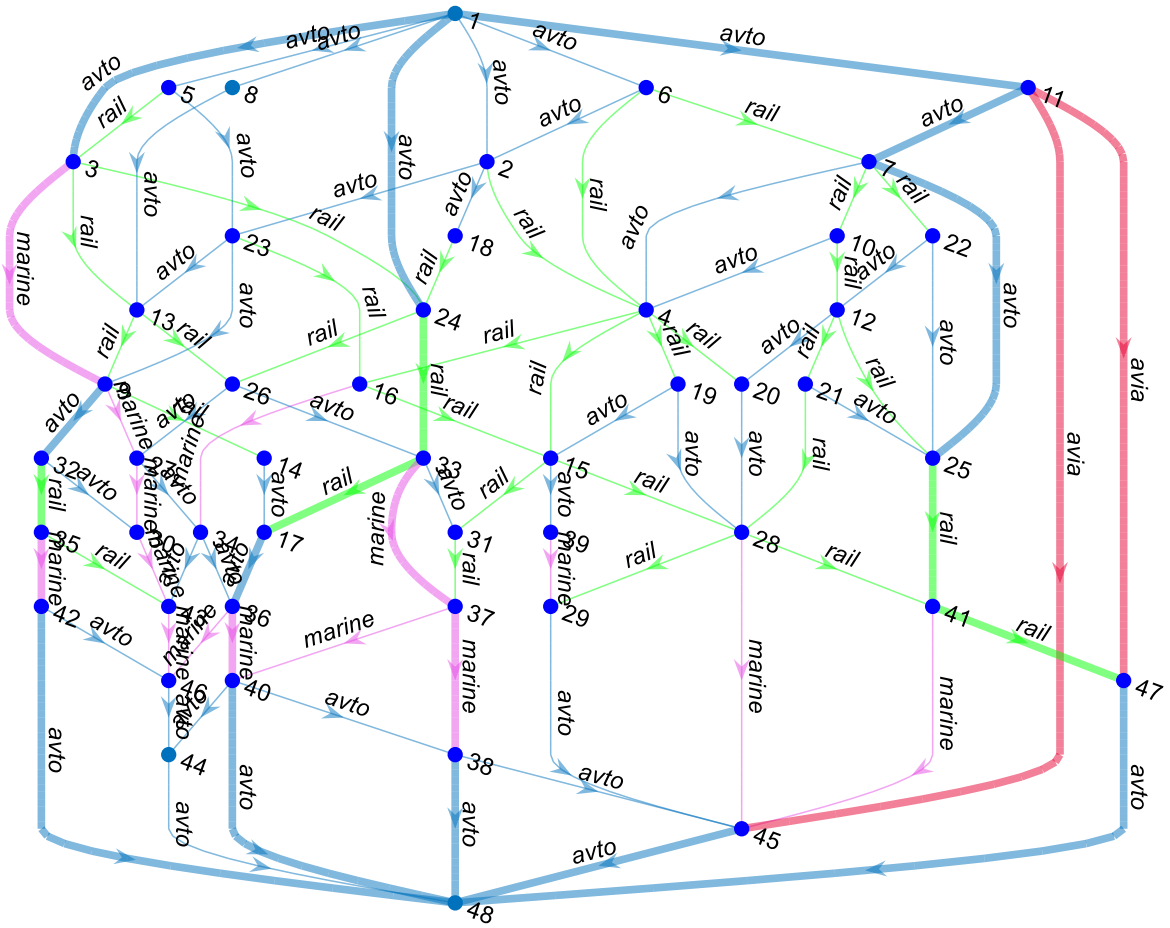


Рис. 5. Множина рішень Парето-фронту, отримана за допомогою алгоритму NSGA-III

Парето-фронт являє собою множину недомінованих цільових векторів, кожен з яких є кращим за інші за значенням хоча б однієї цільової функції. Таким чином, кожен із поданих маршрутів є кращим за хоча б один інший маршрут, що відповідає цільовому вектору отриманої множини Парето, або за критерієм вартості перевезення або за критерієм терміну доставки.

Отже, виділення з цієї множини єдиного рішення, яке максимально задовольняє всі технічні вимоги, є окремим завданням, що іноді також може мати значну складність. Ключовим моментом для вирішення даного завдання є вибір методу, що найкращим чином враховує всі фактори, які є важливими при прийнятті даного рішення.

Існують методи, які не потребують додаткової інформації, як, наприклад, метод граничної корисності (англ. marginal utility method). Однак при виборі маршруту необхідно враховувати вимоги вантажовідправника щодо терміну доставки та вартості перевезення. У зв'язку з цим значний інтерес має так званий метод зважених стрес-функцій (англ. Weighted

Stress Function Method, WSFM). Його основними перевагами є орієнтованість на багатокритеріальний вибір із можливістю врахування ступеня важливості кожного критерію, а також врахування значення ідеального вектора при здійсненні вибору.

Даний метод був інспірований поведінкою пластичних матеріалів певного класу, таких як термопластичні вулканізати. Ці матеріали є особливою групою термопластичних еластомерів, які мають цікаві механічні властивості. Стрес і напруження – це два різні, але тісно пов'язані між собою поняття. Стрес визначається як сила, що припадає на одиницю площі, яка може викликати зміну предмета або фізичного тіла. Напруження визначається як величина деформації, якої може зазнати матеріал внаслідок застосування стресу. Зв'язок між стресом і напруженням, який демонструє конкретний матеріал, відображується кривою напруження та деформації.

Цей метод побудовано на аналогії із стресово-деформаційною поведінкою матеріалу. Таким чином, стрес визначається як різниця між ідеальною точкою і цільовим вектором (рис. 6). Величина стресу також залежить від ваги критерію.

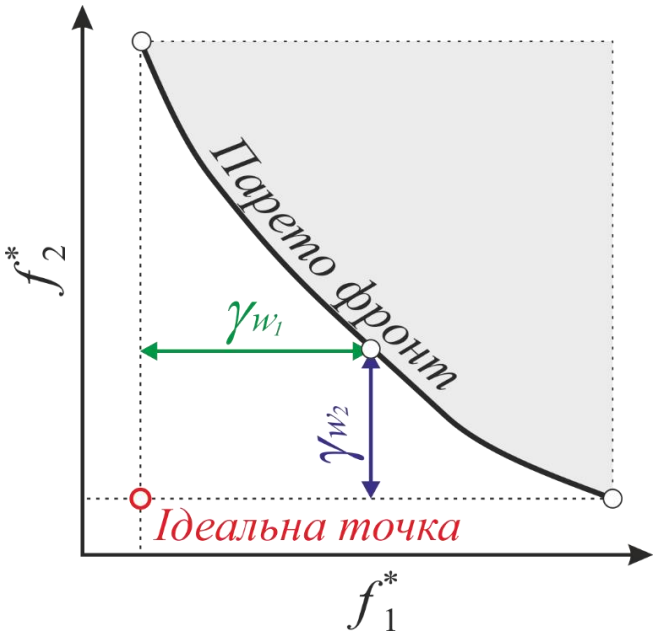


Рис. 6. Визначення стрес-функції

Отже, величина стресу залежить від ваг, які асоціюються із кожним критерієм, тобто компонентом цільового вектора. Таким чином, вага, що відповідає певному критерію, є аналогом параметра еластичності матеріалу за певним напрямком дії зусилля (стресу). Оптимальному рішенню відповідає цільовий вектор, який провокує мінімальний рівень стресу. Обчислення величин стрес-функцій базується на значеннях цільових векторів, але для цього значення цільових функцій потребують нормалізації таким чином, щоб вони належали числовому інтервалу $[0,1]$. Нормалізоване значення цільової функції можна отримати за формулою

$$f_{ij}^* = \frac{f_{ij} - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \qquad (5)$$

де f_{ij} – значення i-ї цільової функції j-го цільового вектора Парето-фронту;

$f_i^{\min}$, $f_i^{\max}$ – мінімальне і максимальне значення i-ї цільової функції по всій множині точок Парето-фронту.

Відповідне значення стрес-функції можна обчислити так:

$$\gamma_{ij}\left(f_{ij}^*, w_i\right) = 1 + \alpha_{ij}\left(f_{ij}^*, w_i\right)\beta_i\left(w_i\right), \quad (6)$$

де $\alpha_{ij}\left(f_{ij}, w_i\right)$ і $\beta_i\left(w_i\right)$ – коефіцієнти еластичності, що відповідають компонентам цільових векторів та обраним вагам.

Другий коефіцієнт розраховується за формулою [7]

$$\beta_i\left(w_i\right) = 1 - \frac{tg\left(\dfrac{\pi\left(2w_i - 1\right)}{2\left(1+\delta_2\right)}\right)}{tg\left(\dfrac{\pi}{2\left(1+\delta_2\right)}\right)}, \quad (7)$$

де δ_2 – параметр, значення якого приймаємо на рівні $\delta_2 = 0,008$, як найкраще значення, що було встановлене досвідним шляхом [8].

Перший коефіцієнт знаходимо за такою формулою:

$$\alpha_{ij}\left(f_{ij}^*, w_i\right) = \begin{cases} s\dfrac{tg\left(\dfrac{\pi\left(f_{ij}^* - w_i\right)}{\psi_i\left(w_i\right)}\right)\psi_i\left(w_i\right)}{tg\left(\dfrac{\pi w_i}{\phi_i\left(w_i\right)} - \delta_1\right)\phi_i\left(w_i\right)}, & f_{ij}^* \geq w_i \\ \dfrac{tg\left(\dfrac{\pi\left(f_{ij}^* - w_i\right)}{\phi_i\left(w_i\right)}\right)}{tg\left(\dfrac{\pi w_i}{\phi_i\left(w_i\right)}\right)}, & f_i < w_i \end{cases}, \quad (8)$$

де додаткові коефіцієнти визначаються як $\psi\left(w_i\right) = \frac{3}{4}w_i^2 + 2\left(1 - w_i\right) + \delta_1$ та $\phi\left(w_i\right) = \frac{3}{4}w_i^2 + w_i + \delta_1$;

δ_1 – додатковий параметр, який використовується для відлаштування від зони, що наближена до асимптоти;

S – коригуючий коефіцієнт, який застосовано для забезпечення плавності при сполученні двох частин кривої.

Слід зазначити, що у роботі [7] подано формулу без коригуючого коефіцієнта, що робить її непридатною для практичного застосування, у статті [8] наведено значення $\delta_1 = 0,002$, як найкраще значення, встановлене досвідним шляхом. Однак при даному значенні мають місце значні викривлення форм кривих, що призводить до втрати сенсу застосування даного методу. Досвідним шляхом було встановлено, що значення параметра δ_1, при яких дані викривлення відсутні,

знаходиться у межах $0,33 < \delta_1 < 0,88$. При здійсненні розрахунків значення параметра було прийнято на рівні $\delta_1 = 0,5$.

Також потрібно виділити, що значення коригуючого коефіцієнта S залежить від значень параметрів δ_1 та w_i. При здійсненні розрахунків застосовувався такий вигляд залежності: $s\left(w_i, \delta_1\right) = 0,4\left(\frac{w_i}{\delta_1}\right)^{0,1 w_i \delta_1}$. Номограма залежностей, яка розрахована із використанням вищенаведених формул, наведена на рис. 7.

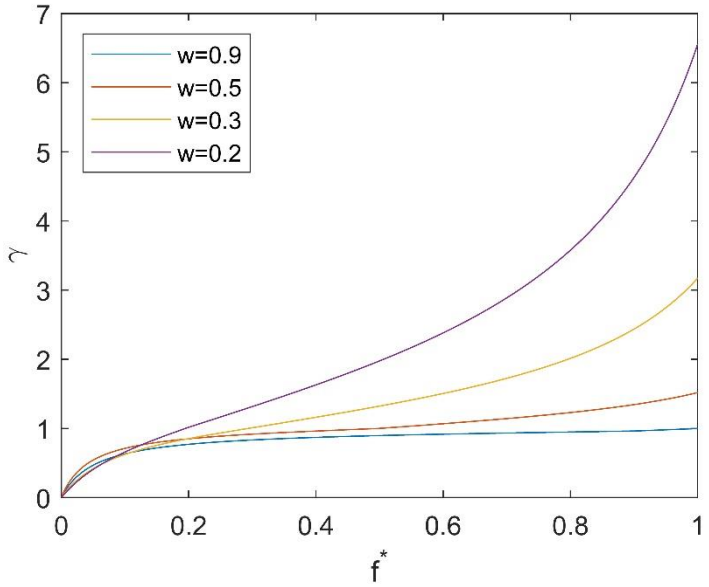


Рис. 7. Номограма взаємозалежності стрес-функції та значення нормалізованої цільової функції при різних значеннях вагового коефіцієнта

Дана номограма (рис. 7) є аналогом кривих напруження та деформації, де середня частина кривих представляє найбільш пластичну фазу деформації матеріалу.

Отже, цільовий вектор множини Парето і відповідні йому значення керуючої змінної t_0 та керуючого змінного вектора X, що відповідають оптимальному рішенню, повинні також відповідати мінімуму такої цільової функції:

$$Q\left(X_j, t_{0j}\right) = \left|\gamma_{1j}\left(f_{1j}^*\left(X_j, t_{0j}\right), w_1\right) - \gamma_{2j}\left(f_{2j}^*\left(X_j, t_{0j}\right), w_2\right)\right| \to \min . \quad (9)$$

За методом зваженої стрес-функції були проведені розрахунки. Величини вагових коефіцієнтів, що відображують рівень значущості критеріїв, були прийняті такі: $w_1 = 0,6,\ \ w_2 = 0,4$. Результати було зведено в таблицю.

Таблиця

Результати розрахунків щодо визначення оптимального маршруту інтермодального контейнерного перевезення

Номер	Маршрут	Загальна відстань	$C(x)$, $\{f_1(x)\}$, \$/конт	$T(x)$, $\{f_2(x)\}$, год	$f_1^*(x)$	$f_2^*(x)$	$Q(x)$
1	1,24,33,37,38,48	4604	4036,36	169,57	0	1	0,981615
2	1,3,9,32,35,42,48	4116	4492,69	153,88	0,0376	0,8967	0,430953
3	1,24,33,17,36,40,48	2964	4818,74	100,81	0,0645	0,5476	0,395761
4	1,11,7,25,41,47,48	2407	5203,52	57,86	0,0962	0,265	6,906039
5	1,11,47,48	4147	12099,70	17,84	0,6648	0,0018	1,534167
6	1,11,45,48	4458	16166,13	17,57	1	0	17,35612

За результатами розрахунку, оптимальний маршрут відповідає цільовому вектору 3, оскільки він має мінімальне значення функції Q. На рис. 8 наведено Парето-фронт та показано відстань між точкою рішення та ідеальною точкою.

На рис. 9 показано оптимальний маршрут на графі транспортної мережі.

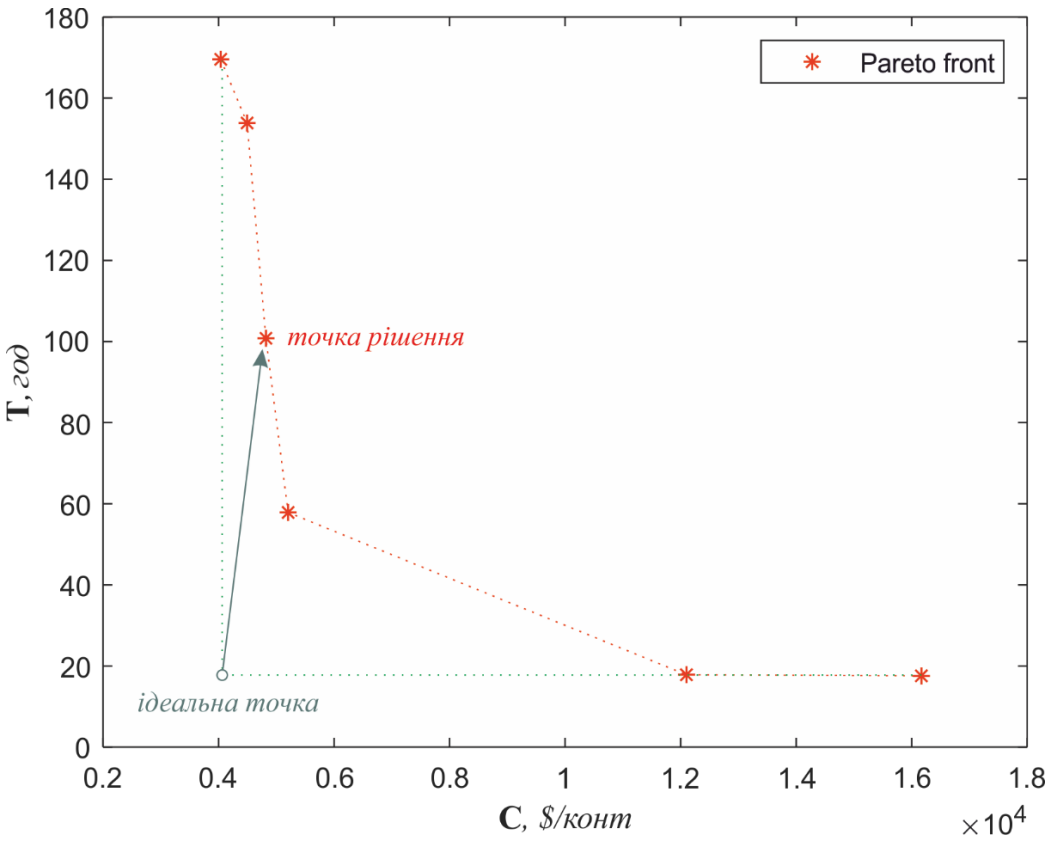


Рис. 8. Відстань між точкою рішення та ідеальною точкою

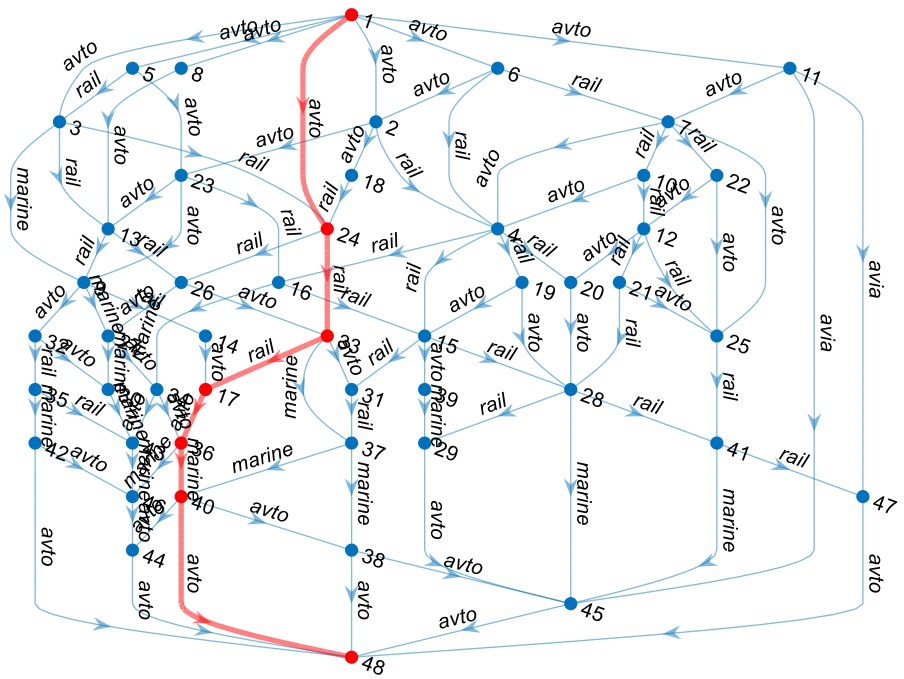


Рис. 9. Оптимальний маршрут інтермодального контейнерного перевезення на графі транспортної мережі

За результатами розрахунку, довжина маршруту склала 2964 км, тривалість маршруту – 100,81 год, а вартість перевезення одного контейнера – 4818,74 доларів США. За оцінками експертів та проведеними розрахунками, дана технологія забезпечить скорочення витрат інтермодальних операторів в середньому на 8 % за умови її застосування на складних транспортних мережах і до 50 % скорочення тривалості перевезення у порівнянні з традиційною технологією планування.

Висновки. У результаті дослідження було встановлено, що розроблена математична модель, яка складається з двох цільових функцій та системи обмежень, дозволяє адекватно відтворювати процес планування інтермодальних перевезень, використовуючи як вихідні дані графові структури великої розмірності та всю необхідну додаткову інформацію. Результати моделювання підтверджують, що математична модель і розроблений метод її оптимізації, який полягає у послідовному використанні спеціалізованих засобів математичного апарату, дозволяють досягати поставленої мети і є раціональним вибором як основа автоматизованої технології планування інтермодальних перевезень. Дана технологія забезпечить скорочення витрат інтермодальних операторів в середньому на 8 % за умови її застосування на складних транспортних мережах і до 50 % скорочення тривалості перевезення у порівнянні з традиційною технологією планування.

Список використаних джерел

1. Chang T. S. Best routes selection in international intermodal networks. *Computers&Operations Research.* 2008. № 35(9). P. 2877–2891.

2. Wang X., Meng Q. Discrete intermodal freight transportation network design with route choice behavior of intermodal operators. *Transportation Research Part B Methodological.* 2017. № 95. P. 76–104.

3. Gremm C. The effect of intermodal competition on the pricing behaviour of a railway company: Evidence from the German case. *Research in Transportation Economics.* 2018. № 72. P. 49–64.

4. Lin N. CO2 emissions mitigation potential of buyer consolidation and rail-based intermodal transport in the China-Europe container supply chains. *Journal of Cleaner Production.* 2019. № 240. P. 118–121.

5. Liu D., Yang H. L. Optimal slot control model of container sea-rail intermodal transport based on revenue management. *Procedia – Social and Behavioral Sciences.* 2013. № 966. P. 1250–1259.

6. Fan Q., Jin Y., Wang W., Yan X. A performance-driven multi-algorithm selection strategy for energy consumption optimization of sea-rail intermodal transportation. *Swarm and Evolutionary Computation.* 2019. № 44. P. 1–17.

7. Denysiuk R., Gaspar-Cunha A. Weighted Stress Function Method for Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *Proceedings of 9th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2017).* Münster, Germany, 2017, March 19-22. P. 176–190.

8. Ferreira J. C., Fonseca C. M., Gaspar-Cunha A. Methodology to select solutions from the pareto-optimal set: a comparative study. *Proceedings of 9th Annual Conference on Genetic on Evolutionary Computation (GECCO 2007). ACM*. New York. P. 789–796.

Бутько Тетяна Василівна, д-р техн. наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-89. E-mail: uermp@ukr.net.
Костєнніков Олексій Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-85.
E-mail: aleksejkostennikov3@gmail.com.
Прохоров Віктор Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-88.
E-mail: vicmmx@gmail.com.
Шапатіна Ольга Олександрівна, асистент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-85. E-mail: shapatina@ukr.net.

Butko Tetiana, D.Sc. (Tech.), Professor, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-89. E-mail: uermp@ukr.net.
Kostiennikov Oleksii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Freight and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-85. E-mail: aleksejkostennikov3@gmail.com.
Prokhorov Victor, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Operational Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-89. E-mail: vicmmx@gmail.com.
Shapatina Olga, Assistant, Department of Freight and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-85. E-mail: shapatina@ukr.net.

Статтю прийнято 29.11.2019 р.

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

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

Випуск 188

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в 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.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактори Буранова Н. В., Третьякова К. А.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 03.12.2019 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 7,0. Тираж 55. Замовлення № .

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