



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 202

Харків 2022

УДК 656.2(062)

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

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

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

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

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

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

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

Реферативна база

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

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р.
Друкується за рішенням науково-технічної ради університету, протокол № 8 від 22 грудня 2022 р.

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

Редакційна колегія

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

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

Залізничний транспорт (273)

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

Будівництво та цивільна інженерія (192)

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

Механічна інженерія (131, 132, 133)

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

Транспортні технології (275)

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

Геодезія та землеустрій (193)

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

Теплоенергетика (144)

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

ЗМІСТ

Теплоенергетика (144)

<i>Редько І. О., Бурда Ю. О., Півненко Ю. О., Біловол Г. В., Москальов Є. О., Бойко В. І.</i> Числове та експериментальне моделювання процесів спалювання низькокалорійних газових палив	6
<i>Алфьоров С. О.</i> Дослідження паливно-повітряного потоку всередині вихрової топки з киплячим шаром із застосуванням спеціальної повітророзподільної насадки	15
<i>Синіло О. О.</i> Підвищення ефективності використання водяних систем променевого опалення	21

Будівництво та цивільна інженерія (192)

<i>Філоненко О. І., Юрін О. І., Магас Н. М., Руденко В. В., Семко П. О., Токарь Б. С.</i> Сучасна архітектура та енергоефективність	27
---	----

Геодезія та землеустрій (193)

<i>Козарь В. І., Бахарєв В. С., Гальченко Н. П., Дорожко Є. В.</i> Концептуальне моделювання бази даних ГІС-моніторингу електромагнітного забруднення поселень	36
<i>Головачов В. В.</i> Математичне моделювання регіонального розвитку	48

Залізничний транспорт (273)

<i>Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А., Шелест Д. А., Синявський А. В.</i> Дослідження системи керування пристроєм плавного пуску асинхронного двигуна	62
<i>Сулим А. О.</i> Порівняльний аналіз підходів до визначення параметрів ємнісного накопичувача енергії для електрорухомого складу	77

Транспортні технології (275)

<i>Губаревич О. В.</i> Комплексне дослідження впливу пошкоджень обмотки статора асинхронних двигунів при експлуатації транспортних засобів	99
<i>Кравець А. Л., Кравець А. М., Шапатіна О. О.</i> Збільшення швидкості здійснення вантажних перевезень за рахунок їхньої оптимізації	111
<i>Калмиков О. О., Захаров Д. С., Грибенюк С. М., Алатаєв Д. А.</i> Система безпеки пішоходів RS PSS	117

Статті оглядово-дискусійного характеру

<i>Канівець О. М.</i> Прогнозування змін чинників формування моніторингу використання земель об'єднаних територіальних громад	132
---	-----

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 581.9:504.54

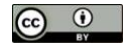
**ЧИСЛОВЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
СПАЛЮВАННЯ НИЗЬКОКАЛОРИЙНИХ ГАЗОВИХ ПАЛИВ**

Д-р техн. наук І. О. Редько, асистенти Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко,
канд. техн. наук Г. В. Біловол, магістранти Є. О. Москальов, В. І. Бойко

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELING OF LOW-CALORIE GAS FUELS
COMBUSTION PROCESSES**

**Dr. Sc. (Tech.) I. Redko, assistant Y. Burda, assistant Y. Pivnenko, PhD (Tech.) H. Bilovol,
master Y. Moskalov, master V. Boiko**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273496>



***Анотація.** Метан, що міститься у вугільних пластах, давно розглядається як альтернатива імпортованому природному газу. Уловлювання та використання метану можуть суттєво підвищити додану вартість гірничодобувних робіт, підвищити безпеку умов праці та зменшити негативний вплив на довкілля. Але існує низка технічних і технологічних труднощів, що гальмують розвиток видобутку та утилізації метану. У роботі проведено експериментальне моделювання процесу спалювання вугільного метану в подових пальниках модернізованої конструкції. Виконано аналіз зміни екологічних параметрів процесу спалювання. Наведено результати показників спалювання метану в подових пальниках, встановлено діапазон зміни абсолютної швидкості та температури газу.*

***Ключові слова:** шахтний метан, комп'ютерне моделювання, технології спалювання, подовий пальник.*

***Abstract.** Methane, which is found in coal seams, has long been seen as an alternative to imported natural gas. Capturing that victorious methane can immediately increase the versatility of the production of footwear, increase the safety of the minds of the workforce, and change the negative impact to dovkilliya. And yet, there are low technical and technological folds, which galmuyut the development of the type of bottle and utilization of methane.*

One of the main directions of extraction of coal mine methane is the generation of thermal energy in boiler houses and other heat generators. However, this type of paliva is unstable in concentration and important, due to the fact that the technical riven has the same characteristics. The current development of technology and technology, in general, allows you to successfully improve the nutrition of methane. There are very few data on environmental and energy indicators for the process of scalding with different palnikov outbuildings.

In the coal mines of the Donbass, there is a widespread stagnation of the boiler room with bottom (hollow) toe shoes. Further indications of scalding with different design features of this type of stokers will help to improve nutrition by reducing the chemical insufficiency of scalding gas and increasing the thermal pressure of the boiler.

It is shown that the computer simulation and re-verification of the efficiency of coal mine methane scorching in scorching boilers from the stoking of bottom (hollow) stokers is shown to be possible.

In the robot, an experimental simulation of the process of burning coal methane in the bottom of the burners of a modernized design was carried out, and tests were carried out on the distribution of medium-mass parameters in the gas at the exit from the fire line from the vicarious grids. And also, an analysis of stationary watering of the average characteristics of the flow-fluidity, temperature, concentration of components, nitrogen oxide and nitrogen oxide fluidity was carried out.

Keywords: mine methane, computer modeling, combustion technologies, floor burner.

Вступ. В останні десятиліття у світі різко зросла увага до проблем метану, бо його присутність в атмосфері впливає на температуру Землі та клімат. Метан – другий, найбільш поширений, парниковий газ після діоксиду вуглецю (CO₂). Уловлювання метану та використання його як палива має енергетичні, економічні переваги, а також переваги, пов'язані з питаннями безпеки вуглевидобутку та охорони навколишнього середовища. Уловлювання метану на вугільних шахтах дозволяє підвищити безпеку за рахунок зниження ризику вибухів метаноповітряної суміші в шахтах.

Одним із основних напрямів використання шахтного метану є вироблення теплової енергії в котельних та інших генераторах теплоти. Однак такий вид палива є нестабільним за концентрацією і важливо, щоб технічний рівень обладнання відповідав його особливостям. Сучасний стан розвитку техніки та технологій у цілому дозволяє досить успішно вирішувати питання використання метану. Але даних за екологічними та енергетичними показниками процесу спалювання при використанні різних пальникових пристроїв вкрай мало. На гірничодобувних шахтах Донбасу широко застосовується опалювальне котельне обладнання з подовими (щільними) пальниками. Дослідження показників спалювання при різних конструктивних особливостях такого типу пальників допоможе вирішити питання зі зниження хімічної неповноти

спалювання газу та підвищення теплової потужності котла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підприємства вугільної промисловості в Донецькому вугільному басейні України отримують і викидають в атмосферу близько 1,2 млрд м³/р. шахтного метану, близько 15 % обсягу уловлюється [1, 2]. Раціональне використання шахтного метану – це його спалювання на котельнях і радіаційних випромінювачах, сушильних установках, змішувальних повітро-нагрівачах для обігріву шахтних стволів, у когенераційних установках при виробництві електроенергії, технологічних процесах та ін. Використання вугільного метану дає змогу збільшити енергоозброєність шахт на 20 %. Найбільш ефективним за енергетичним критерієм є використання вугільного метану як палива мобільних електростанцій [3].

Шахтний метан характеризується змінним складом і витратами через різні газоносності вугільних пластів. Запобігання небезпечним скупченням метану у виробках пластів вугільних шахт здійснюється шляхом дегазації через вертикальні дегазаційні свердловини [4]. Система дегазації шахт України відрізняється від європейської. В Україні її проєктували на викид отриманого шахтного метану за межі гірничої виробки, не враховуючи перспектив його використання. Тому значна частина метану видаляється через систему вентиляції. Україна є найбільшим джерелом викидів шахтного метану, за кількістю викидів

займає четверте місце у світі [4]. Далі, через низьку герметичність до системи дегазації надходить повітря і в метано-повітряній суміші концентрація метану змінюється в широких межах від 2,5 до 42 % (2,5-25 % некондиційний метан), при цьому в суміші міститься крапельна і парова волога, вугільний пил, тому потрібна додаткова підготовка газу. Концентрація кисню становить від 5 до 12 об'ємних відсотків. Концентрація діоксиду вуглецю змінюється в межах 18-21 %. При цьому концентрація компонентів суміші може змінюватися стрибкоподібно, що ускладнює використання суміші в газових двигунах для вироблення електроенергії. Система утилізації містить дороге устаткування і тому найпростіше рішення – це енергетичне використання шахтного метану в котельних установках. Промисловістю випускаються автономні модульні котельні, оснащені вузлом підготовки шахтного метану, використання спеціальних автоматизованих пальникових блоків. Але на сьогодні на шахтних котельнях, оснащених котлами типу ДКВР, використовуються подові, ГМГ, вертикальні щілинні пальники. Пальники цих типів не комплектуються системами автоматики.

Видобуток і використання метану сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища [2]. Дані щодо екологічних і енергетичних характеристик у різних пальникових пристроях при спалюванні вугільного метану практично відсутні. У роботах [5, 6] наведено дані моделювання процесу дифузійного спалювання природного газу в прямоточно-вихровому пальнику.

Найбільш простими є дифузійні пальники [5]. Газ впливає з отворів, а необхідне для горіння повітря надходить з навколишнього середовища. Процеси змішування газу і повітря відбуваються на виході газу з пальника.

Дифузійні пальники застосовують для спалювання штучних низькокалорійних

газів (сланцевий, коксовий, генераторний та ін.), спалювання природного і скрапленого газу.

Застосування подових (щілинних) пальників в опалювальних котлах недостатньо ефективно, оскільки низька ефективність процесів змішування газу і повітря зумовлюють підвищення коефіцієнта надлишку повітря, при цьому збільшується довжина факела, що при зіткненні полум'я з теплообмінними поверхнями призводить до зростання хімічної неповноти спалювання газу.

Отже, збільшення споживання газу та теплової потужності котла обмежена технологічними та екологічними режимами спалювання палива.

Однак подові пальники широко застосовуються, тому в цій роботі проведено дослідження спалювання вугільного метану в пальниках такої конструкції.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є комп'ютерне моделювання та перевірка ефективності спалювання шахтного метану в опалювальних котлах із застосуванням подових (щілинних) пальників.

Для досягнення сформульованої мети необхідно виконати моделювання утворення монооксиду вуглецю, тестові розрахунки середньомасових параметрів газу на виході з вогневої щілини з використанням сіток, а також провести аналіз стаціонарних полів усереднених характеристик течії – швидкості, температури, концентрацій компонентів, оксиду азоту та швидкості утворення оксиду азоту.

Основна частина дослідження. Склад шахтного газу такий (%): CH_4 – 38,6; C_2H_6 – 1,32; C_3H_8 – 0,25; C_4H_{10} – 0,07; $\text{C}_5 < 0,008$; CO – 0,0001; H_2 – 0,008; CO_2 – 0,08; N_2 – 47,1; O_2 – 13,4; Ar – 0,86.

Теплота згоряння шахтного газу становить близько 13 МДж/м³.

Подовий пальник складається з двох елементів: сталева безшовна труба

(колектор) з просвердленими в ній отворами для виходу паливного газу і вогневв частинв. Остання являє собою щілину, викладену з вогнетривкої цегли і розташовану над трубою пальника. Отвори

розташовуються на трубі у два ряди в шаховому порядку. Загальну інформацію щодо вихідних даних для розрахунку подано в табл. 1.

Таблиця 1

Конструктивні параметри пальника та показники спалюваного газу

Параметр	Серійний пальник	Модифікований пальник
Зовнішній діаметр труби d_n , мм	40	57
Діаметр отворів паливного газу d_o , мм	1,9	2,1
Напівкрок між отворами δ , мм	8	8
Ширина вогневої щілини a , мм	86	108
Висота вогневої щілини $h_{щ}$, мм	266	266
Температура повітря у вузькому перерізі щілини, К	273	273
Швидкість повітря у вузькому перерізі щілини, м/с	2,44	2,44
Температура паливного газу на виході з отворів, К	273	273
Швидкість паливного газу на виході з отворів, м/с	27	27
Склад паливного газу, % (об):		
метан	100,0	38,6
кисень	-	13,4
азот	-	48,0

Виходячи з припущення про те, що горіння контролюється змішуванням, а не кінетикою, для моделювання турбулентного горіння використана модель дроблення турбулентних вихорів Магнуссен і Хертагера [7].

Моделювання утворення монооксиду вуглецю засновано на використанні двустадійної реакції окиснення метану. Для знаходження масової частки оксидів азоту система рівнянь доповнюється рівнянням перенесення для NO, що утворюються з термічного механізму [8]. Автором роботи [9] було доведено, що утворення оксидів азоту не пов'язано безпосередньо з реакцією горіння, а йде через дисоціацію молекулярного кисню при температурі вище 1800 К. Механізм утворення NO складається з елементарних реакцій [10].

Вводиться припущення про те, що утворення NO не впливає ні на гідродинамічну структуру течії, ні на температуру газу в пальниковому пристрої.

Теплова потужність пальників (серійної і модифікованої) однакова, тобто витрати вугільного метану збільшено у 2,7-2,8 раза порівняно з витратами природного газу. Подовий пальник складається з двох елементів: сталевий безшовної труби (колектора) з просвердленими в ній отворами для виходу паливного газу і вогневої частини. Остання являє собою щілину, викладену з вогнетривкої цегли, і розташовується над трубою пальника. Отвори розташовуються на трубі у два ряди в шаховому порядку. Розрахункові схеми подового пальника і щілинного каналу подано на рис. 1.

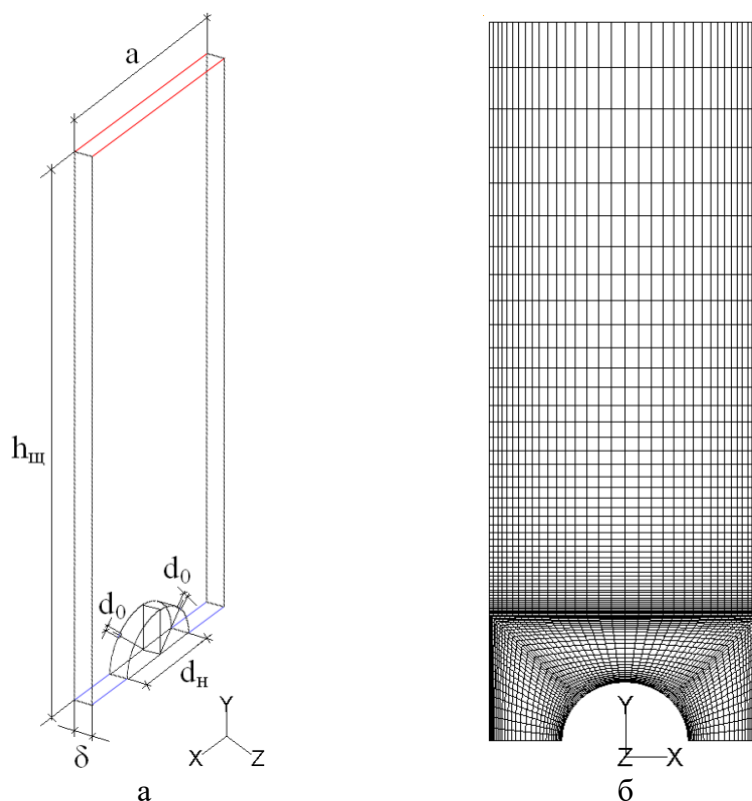


Рис. 1. Розрахункові схеми (а) подового пальника і (б) щілинного каналу

Пальник має такі характерні розміри:

- зовнішній діаметр труби d_n ;
- діаметр отворів для виходу паливного газу d_0 ;
- напівкрок між отворами δ ;
- ширина вогневої щілини a ;
- висота вогневої щілини.

Виконано тестові розрахунки з використанням сіток з різною кількістю осередків. Встановлено, що сітка (близько 10^6 контрольних обсягів) забезпечує прийнятну низьку чутливість результатів до подальшого подрібнення сітки.

Пальник має такі розміри: зовнішній діаметр труби $d_n = 57$ мм; діаметр отворів для виходу паливного газу $d_0 = 2,1$ мм; напівкрок між отворами $\delta = 8$ мм; ширина вогневої щілини $a = 108$ мм; висота вогневої щілини $h_{щ} = 266$ мм. Температура повітря у вузькому перерізі щілини дорівнює 273 К. Швидкість повітря у

вузькому перерізі щілини становить 2,44 м/с. Температура паливного газу на виході з отворів дорівнює 273 К. Швидкість паливного газу на виході з отворів становить 27 м/с.

Паливний газ має такий склад (за об'ємом):

варіант 1: метан CH_4 – 100 %;

варіант 2: метан CH_4 – 38,6 %; кисень O_2 – 13,4 %; азот – 48,0 %.

Результати обчислювального експерименту наведено в табл. 2. Результати показують, що значення швидкості і температур у модифікованому пальнику значно нижче (9,41 і 5,34 м/с відповідно, 1803 і 1033 К відповідно). При цьому забезпечується повне спалювання вугільного метану (CH_4 і CO у продуктах згорання практично відсутні). Низькі швидкості і температура згорання забезпечують також факел малої довжини.

Середньомасові параметри газу на виході з вогневої щілини

Параметр	Варіант 1	Варіант 2
Швидкість, м/с	9,41	5,34
Температура, К	1803	1033
Масова частка CH_4	0,0047	$2,8 \cdot 10^{-07}$
Масова частка O_2	0,0622	0,1604
Масова частка CO	0,0055	$4,1 \cdot 10^{-06}$
Масова частка CO_2	0,1029	0,0467
Масова частка H_2O	0,0914	0,0383
Масова частка N_2	0,7332	0,7546
Масова частка NO	$7,6 \cdot 10^{-06}$	$9,4 \cdot 10^{-07}$
Швидкість утворення NO , кмоль/($\text{м}^3 \cdot \text{С}$)	0,0066	$8,9 \cdot 10^{-07}$
Щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$	0,1945	0,3466
Удавана молекулярна маса	28,4598	28,4562

Екологічні параметри, що характеризуються вмістом оксидів азоту і вуглецю в продуктах згорання, мають значення значно нижче в модифікованому пальному. Так, масова частка NO становить $8,9 \cdot 10^{-07}$, CO – $4,1 \cdot 10^{-06}$. У роботі аналізуються стаціонарні поля усереднених характеристик течії – швидкості,

температури, концентрацій компонентів, оксиду азоту та швидкості утворення оксиду азоту. Швидкість газу (вугільного метану) на виході з отворів подового пальнока становить 25-27 м/с. Результати розрахунку наведено на рис. 2, 3.

Температура в ядрі факела досягає значень 2060-2160 К (рис. 3).

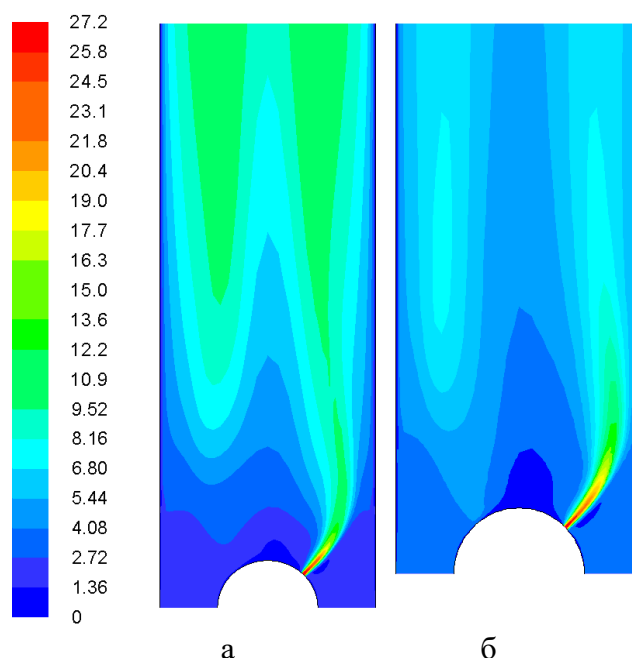


Рис. 2. Абсолютна швидкість газу (м/с) у площині xOy , що проходить через центр отвору для виходу паливного газу: а – варіант 1; б – варіант 2

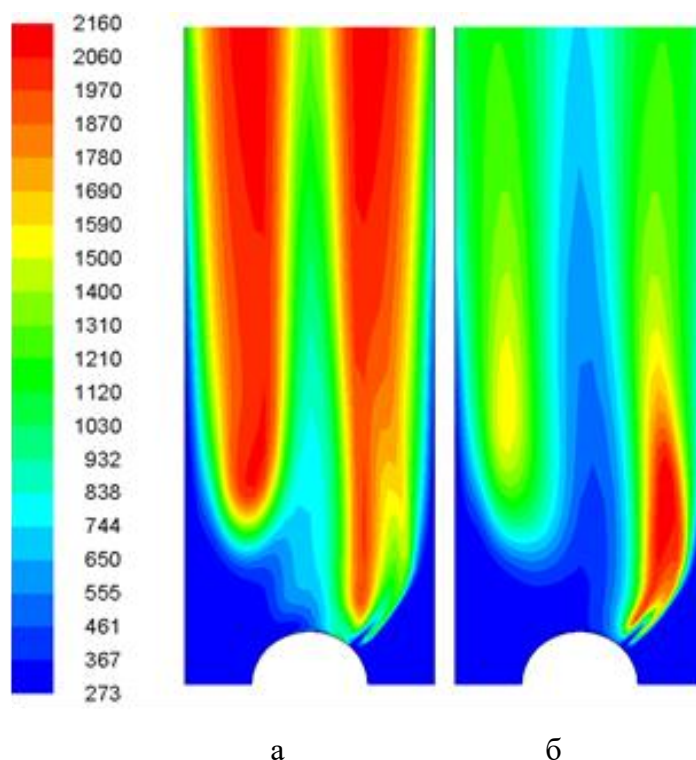


Рис. 3. Температура газу (К) у площині xO_y , що проходить через центр отвору для паливного газу: а – варіант 1; б – варіант 2

У структурі полум'я виділяється кілька зон: підготовча, зона горіння і зона продуктів згорання [6]. У дифузійному полум'ї горюча суміш утворюється в зоні горіння за рахунок дифузії горючого газу з підготовленою зоною і повітря – з навколишнього середовища. Якщо в складі газоповітряної суміші достатньо кисню, то вуглець, що утворюється при термічному розкладанні в підготовчій зоні, встигає попередньо окиснюватися до монооксиду вуглецю (CO), що згорає в зоні горіння з утворенням діоксиду вуглецю (CO₂). Газ горить безбарвним або блакитним полум'ям.

Структура полум'я відповідає ламінарному дифузійному полум'ю і

визначається швидкістю витікання газу з отворів подового пальника і швидкістю руху газоповітряної суміші в обмеженому обсязі щілинного каналу. Зона горіння дифузійного полум'я являє собою тонкий шар (2), визначуваний швидкістю молекулярної дифузії кисню з підготовчої зони до фронту горіння. Швидкість дифузії визначається різницею парціальних тисків і температур у зонах. На рис. 4 показана зміна концентрації діоксиду вуглецю. Як видно, концентрація CO₂ змінюється від мінімальних значень на периферії зони горіння до максимальних на осі факела. Концентрація кисню змінюється до мінімальних значень у ядрі факела.

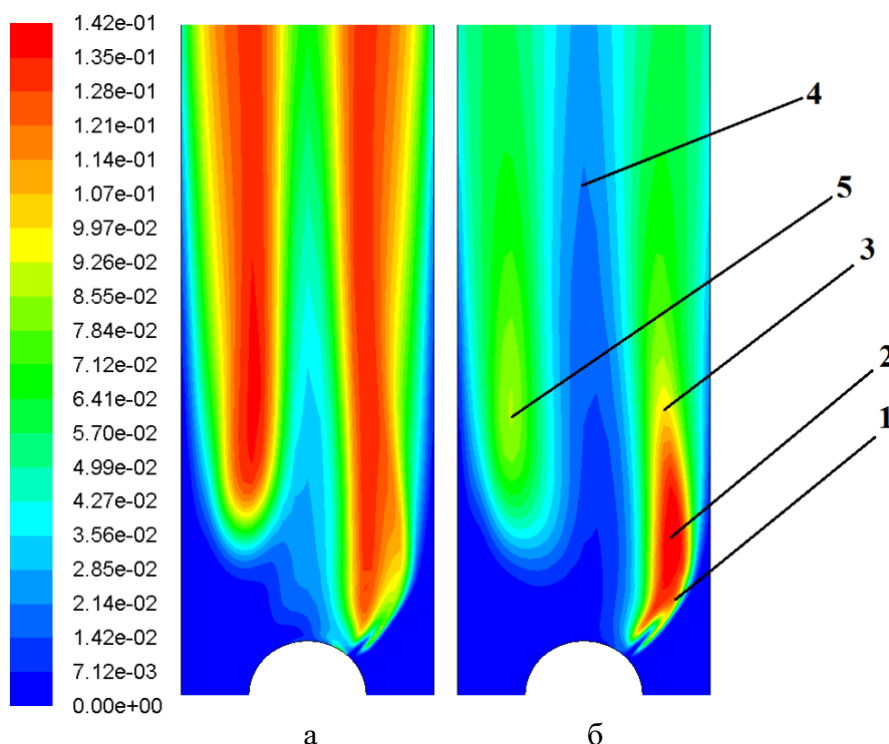


Рис. 4. Масова частка CO_2 у площині xOy , що проходить через центр отвору для паливного газу: а – варіант 1; б – варіант 2

Існування зони рециркуляції (5) (поворотні течії) дає можливість різко збільшити час перебування газоповітряної суміші в обмеженому просторі поблизу пальника. Тим самим поліпшуються умови для змішування реагентів і стабілізації факела.

1. Рециркуляційна зона поблизу пальника, у якій температура факела максимальна.

2. Високотемпературний «купол» (зона 3), що накриває рециркуляційну зону; велика частина променевої енергії випромінюється в цій зоні.

3. Зона змішування горючого і повітря, що оточує зони 1, характеризується зниженим вмістом продуктів (CO_2 , H_2O) і підвищеним вмістом реагентів.

4. Далекий слід (затоплений струмінь) продуктів згорання.

5. Точка утворення зворотних течій (точка 4).

Висновки. При температурах вище 1700-1800 К велика частина оксидів азоту утворюється з «теплого» механізму. Максимальна концентрація NO_x досягається в зоні з максимальною температурою і середньомасова концентрація на виході з пальника становить близько 15-20 mg/m^3 (варіант 1) і 1,8-2 mg/m^3 (варіант 2). Можливість використання шахтного метану як місцевого палива дозволяє зменшити використання твердого палива або природного газу як основного виду палива. Запропонована у статті методика експериментального дослідження процесів спалювання низькокалорійного газового палива створює умови для подальшого вивчення процесів теплообміну в топці котла. Це дозволить підвищувати показники ефективності спалювання метану та більш якісно контролювати обсяги шкідливих викидів з топки.

Список використаних джерел

1. Махорін К. Е., Хінкіс П. А. Спалювання палива в псевдозрідженому шарі. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.
2. Кучин Г. П., Скрипко В. Л., Урда Н. Н. Спалювання низькотемпературних палив у псевдозрідженому шарі. Київ: Техніка, 1987. 144 с.
3. Stolboushkina A. Yu., Ivanova A. I., Fominab O. A. Use of Coal-Mining and Processing Wastes in Production of Bricks and Fuel for Their Burning. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1496-1502. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.089>.
4. Joana Ribeiroa, IsabelSuárez-Ruizb, Colin R.Wardc, Deolinda Floresa. Petrography and mineralogy of self-burning coal wastes from anthracite mining in the El Bierzo Coalfield (NW Spain). *International Journal of Coal Geology*. 15 January 2016. Vol. 154–155. P. 92-106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.011>.
5. Pivnenko Y., Burda Y., Redko I., Cherednik A., Alferov S. Optimization of geometrical parameters of fire wood fluidized bed burner. *Problems of the Regional Energeticsthis link is disabled*. 2021. Vol. 2. P. 49-59.
6. Qin Yan and other. Hourly emission estimation of black carbon and brown carbon absorption from domestic coal burning in China. *Science of The Total Environment*. 25 March 2022. Vol. 814. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151950>.
7. Бородуля В. А., Виноградов Л. М. Сжигание твердого топлива в псевдоожигенном. Минск: Наука и техника, 1980. 192 с.
8. Ісьємін Р. Л. Котел, що працює на низькотемпературному твердому паливі. *Житлове та комунальне господарство*. 2005. № 3. С. 36-37.
9. Пузырев Э. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дисс. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2003. 120 с.

Редько Ігор Олександрович, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. E-mail: ihor.redko1972@gmail.com.

Бурда Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів, Харківський Національний університет будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: burda.yurii@kstuca.kharkov.ua.

Півненко Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів, Харківський Національний університет будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua.

Біловола Ганна Володимирівна, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-6168-5216. E-mail: annabel731@gmail.com.

Москальов Євгеній Олександрович, магістрант, група 215-ЕМ-Д21, Український державний університет залізничного транспорту.

Бойко Вадим Іванович, магістрант, група 215-ЕМ-Д21, Український державний університет залізничного транспорту.

Redko Ihor, Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. Email: ihor.redko1972@gmail.com.

Burda Yurii, Assistant of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: burda.yurii@kstuca.kharkov.ua.

Pivnenko Yurii, Assistant of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua.

Bilovol Hanna, Associate Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0001-6168-5216. Email: annabel731@gmail.com.
Moskalyov Yevgeny, master, Group 215-EM-Д21, Ukrainian State University of Railway Transport.
Boyko Vadym, master, Group 215-EM-Д21, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 17.10.2022 р.

УДК 62-664.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАЛИВНО-ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ВСЕРЕДИНИ ВИХРОВОЇ ТОПКИ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛЬНОЇ ПОВІТРОРОЗПОДІЛЬНОЇ НАСАДКИ

Асп. С. О. Алфьоров

INVESTIGATION OF THE FUEL-AIR FLOW INSIDE A VORTEX FURNACE WITH A FLUIDIZED BED USING A SPECIAL AIR-DISTRIBUTING NOZZLE

Postgraduate student S. O. Alforov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273568>



Анотація. У статті наведено результати експериментального дослідження паливно-повітряного потоку всередині вихрової топки з киплячим шаром із залученням спеціальної повітродозподільної насадки. Для проведення експерименту застосовується спеціальна установка у формі циліндра з насадкою всередині. Насадка має нахил пластин у 15° , що не перевищує 10 % загальної площі живого перерізу камери експериментальної установки. Під час експерименту визначено граничні умови утворення вихрового потоку при різній кількості палива та різних витратах повітря, показано значення втрат тиску і швидкості потоку. Результати надано у графічній формі та формі табличних значень. Так, для 2,9 кг тирси гранична швидкість утворення вихрового потоку становить 0,72 м/с, для 5,8 кг це значення складає 0,57 м/с. Отримані результати дають змогу сформулювати рекомендації щодо удосконалення існуючих твердопаливних топок за рахунок застосування спеціальних насадок для інтенсифікації процесів горіння.

Ключові слова: спалювання палива, вихрові топки, аеродинаміка топки, спеціальна насадка.

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the fuel-air flow inside a vortex furnace with a fluidized bed using a special air distribution nozzle. Nowadays, the issue of dependence on fossil energy resources is the most important problem for the countries of Europe. One of the promising solutions to this problem is the use of vortex solid fuel furnaces for burning low-calorie types of fuel, such as waste from the woodworking and agricultural industries. Our country has developed agricultural and woodworking sectors of the economy, so the amount of waste from these industries is significant, which allows them to be used to cover the energy needs of the state. At the same time, there is a significant number of solid fuel boilers on the territory of Ukraine that can be used for this task. The main difficulties in burning low-grade fuels in solid-fuel boilers are the low level of efficiency of these vortex furnaces and insufficient theoretical information about this. To conduct the experiment, a special installation in the form of a cylinder

with a nozzle inside is used. The nozzle has a plate inclination of 15° , which does not exceed 10% of the total live cross-sectional area of the chamber of the experimental setup. In the course of the experiment, the boundary conditions for the formation of a vortex flow at different amounts of fuel and different air flows were determined, and the values of pressure loss and flow velocity were shown. The results are presented in graphical and tabular form. For example, for 2.9 kg of sawdust, the maximum speed of vortex flow formation is 0.72 m/s, for 5.8 kg this value is 0.57 m/s. The obtained results make it possible to formulate recommendations for the improvement of existing solid fuel furnaces due to the use of special nozzles for the intensification of combustion processes. This creates prospects for the development of the country's energy sector.

Keywords: fuel combustion, vortex furnaces, furnace aerodynamics, special nozzle.

Вступ. Пошук альтернативних викопним джерелам теплової енергії ресурсів є постійною складовою розвитку енергетичної сфери будь-якої держави. Зараз це питання є найбільш актуальним через різні політичні процеси та незмінне зменшення загальної кількості невідновлювальних природних ресурсів. Одним із способів реалізації питання заміщення природного газу, вугілля та інших видів викопного палива є спалювання відходів сільського господарства та деревообробної промисловості. Але це пов'язано зі значною кількістю технічних труднощів і недостатньою теоретичною базою для реалізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вихрова технологія є ефективною сучасною технологією енергетичного використання твердого палива та видалення пилю. До основних переваг низькосортної вихрової технології спалювання належать покращені екологічні показання, стійкість запалення та горіння твердого палива без підсвічування газом або мазутом, використання безмлинових схем підготовки палива. Низькотемпературна вихрова технологія спалювання палива може бути реалізована у традиційній камерній топці шляхом її модернізації. При цьому забезпечується спалювання таких твердих палив, як кам'яне та буре вугілля, горючі сланці, торф, відходи обробки деревини та інші види біопалива.

Киплячий шар у полі сили тяжіння широко застосовується в різних

технологічних установках. Однак інтенсивність процесів при такому способі псевдозрідження лімітується гравітаційними силами, також спостерігаються проблеми з об'ємною однорідністю тепло- та масообміну в шарі. Застосування відцентрового псевдозрідженого шару в тепломасообмінних апаратах дозволяє збільшити інтенсивність процесів за рахунок більш високого значення швидкості обтікання частинок, недопущення утворення пухирів у шарі.

Для організації шару частинок у полі відцентрових сил можуть бути використані різні типи вихрових камер, наприклад камера, що обертається [1-4], камера з нерухомою циліндричною стінкою і повітродозподільним торцем, що обертається [5-7], різні варіанти вихрових камер з нерухомими стінками, у яких шар частинок формується за рахунок закручування потоку [8].

Характеристики шару частинок у полі відцентрових сил залежать як від конфігурації вихрової камери, так і властивостей самого зернистого матеріалу, насамперед щільності та розмірів частинок [9-12].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження аеродинамічних характеристик процесу спалювання деревної тирси у вихровій топці з застосуванням спеціальної повітродозподільної насадки.

Основна частина дослідження. Експеримент проводиться на спеціальній установці (рис. 1), що являє собою камеру з органічного скла (1) висотою 1,2 м і

діаметром 200 мм. На відстані 50 мм від низу камери встановлено повітродіафрагму насадку 2 (рис. 2).

Насадка виконана з оцинкованої сталі товщиною шару 0,001 м. Вона складається з центрального конуса висотою 0,1 м і лопаток, встановлених під кутом 15° . Така конструкція повітродіафрагми має площу живого перерізу $0,016 \text{ м}^2$, що не перевищує 10 % загальної площі живого

перерізу камери експериментальної установки.

Для підведення повітря до камери встановлюється патрубок 3 у нижній частині камери. Для недопущення виносу досліджуваного матеріалу з камери дослідної установки зверху встановлюється захисна сітка 4. Для визначення перепаду тиску всередині камери передбачаються патрубки 5.

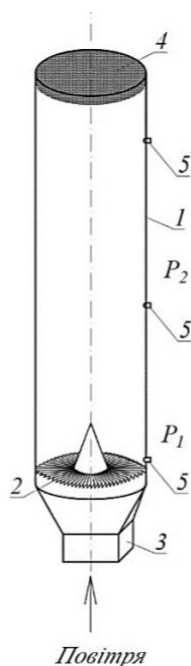


Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки

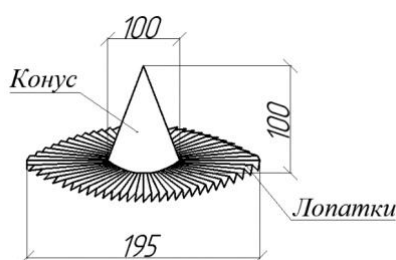


Рис. 2. Габаритна схема повітродіафрагми

Для подачі повітря до установки застосовується вентилятор ВВД 5 з електродвигуном потужністю 3 кВт.

Як досліджуваній матеріал використовується тирса з розміром

частинок не більше $0,003 \text{ м}^2$, вологістю 12 % та насипною щільністю 185 кг/м^3 .

Під час експерименту визначається швидкість повітряно-паливної суміші та перепад тиску за умови різної кількості

повітря, що подається всередину установки.

Для визначення аеродинамічних характеристик суміші повітря і тирси в експериментальній установці з повітророзподільною насадкою в установку на повітророзподільну решітку засипається тирса. При цьому поступово збільшуються витрати повітря.

Для експериментів № 1-5 в установку засипано 2,9 кг тирси, експериментів № 6-10 – 5,8 кг тирси.

Отримані при експерименті результати зведено до таблиці і подано на рис. 3.

На рис. 3 наведено графік залежності витрат тиску від швидкості повітряно-паливної суміші. Номер вимірювання (1-10) відповідає порядковому номеру експерименту за таблицею.

Таблиця

Результати вимірювань

Номер	Витрати повітря $G, \text{ м}^3/\text{с}$	Середня швидкість повітряно-паливної суміші $V, \text{ м/с}$	Перепад тиску $\Delta P = P_1 - P_2, \text{ Па}$
Вага шару тирси 2,9 кг			
1	0,008	0,67	10
2	0,016	0,69	18
3	0,021	0,71	25
4	0,033	0,72	33
5	0,042	0,73	40
Вага шару тирси 5,8 кг			
6	0,008	0,51	50
7	0,016	0,53	64
8	0,021	0,55	78
9	0,033	0,57	94
10	0,042	0,59	110

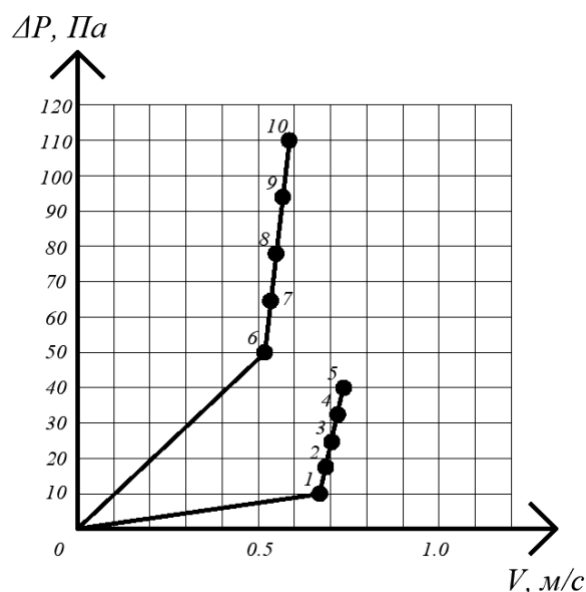


Рис. 3. Графік залежності витрат тиску повітряної суміші від швидкості руху

За умови витрат повітря в межах до $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ і швидкості потоку до $0,7 \text{ м}/\text{с}$ утворюється порівняно невелике підняття маси тирси над насадкою всередині камери (рис. 4, а). Вихровий потік не утворюється.

При значеннях витрат повітряної суміші близько $0,02 - 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ і швидкості $0,7 - 0,72 \text{ м}/\text{с}$ відбувається підняття тирси з невеликим завихренням повітряного потоку (рис. 4, б).

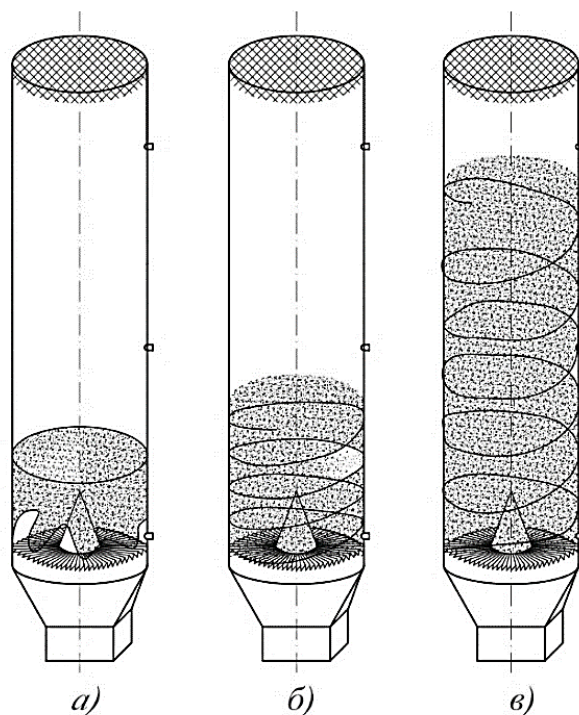


Рис. 4. Характер розповсюдження паливно-повітряної суміші за різних витрат повітря при масі тирси $2,9 \text{ кг}$: а – експеримент № 1; б – експеримент № 3; в – експеримент № 5

За рахунок витрат повітряної суміші $0,03 - 0,045 \text{ м}^3/\text{с}$ і швидкості більше за $0,72 \text{ м}/\text{с}$ утворюється вертикальний потік у вигляді вихору, що піднімається на всю висоту камери установки.

За більшої у два рази порівняно з експериментами № 1-5 маси тирси спостерігається збільшення значень перепадів тиску всередині камери експериментальної установки майже у два рази. При цьому швидкість руху суміші повітря і палива навіть за витрат повітря $0,045 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 5, в) не перевищує $0,6 \text{ м}/\text{с}$.

Шар тирси вагою близько $5,8 \text{ кг}$ (рис. 5) при швидкості повітря до $0,55 \text{ м}/\text{с}$

підіймається окремими зонами, утворюючи «киплячу» зону знизу. При цьому верхня частина шару є нерухомою.

При швидкості повітря в діапазоні значень від $0,55$ до $0,57 \text{ м}/\text{с}$ шар починає підійматися хаотично, утворюючи киплячу зону висотою близько 400 мм .

При швидкості повітря більше $0,57 \text{ м}/\text{с}$ шар тирси вагою близько $5,8 \text{ кг}$ стабілізується і починає рухатися за вихровим напрямком, але, на відміну від меншої вдвічі кількості тирси, рух більшого шару є менш інтенсивним.

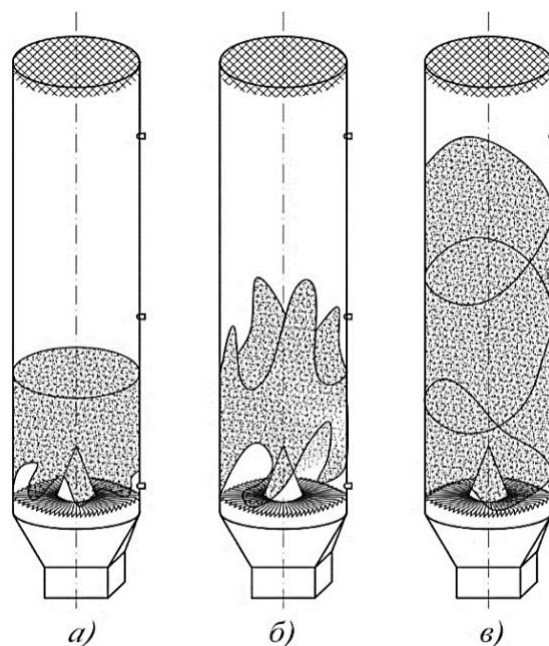


Рис. 5. Характер розповсюдження паливно-повітряної суміші за різних витрат повітря при масі тирси 5,8 кг:
а – експеримент № 6; б – експеримент № 8; в – експеримент № 10

Висновки. При проведенні експериментів визначено оптимальні параметри паливно-повітряної суміші для тирси. При цьому для інтенсифікації повітряного потоку застосовувалася повітророзподільна насадка. Визначено критичні значення швидкостей, при яких починає формуватися вихровий киплячий

шар. У подальшому планується розглянути інші види твердого палива та вплив різних кутів нахилу лопаток на повітророзподільній насадці на аеродинамічні характеристики всередині вихрової топки. Все це дозволить сформулювати рекомендації щодо вдосконалення існуючих твердопаливних вихрових топок.

Список використаних джерел

1. Карп И. Н. и др. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 5 (118). С. 13–20.
2. Бородуля А. В., Пальченко Г. И. Перспективы применения и методы расчета сжигания натурального и денсифицированного биотоплива в кипящем слое. *Вести НАН Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2003. № 3. (247) С. 116–123.
3. Рябов Г. А. Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое: дисс. ... д-ра техн. наук. Москва: ОАО «ВТИ», 2016.
4. Вирясов Д. М. Псевдоожигание и сжигание биотоплива в многокомпонентных слоях: дисс. ... канд. техн. наук. Москва: ФГБОУ «Тамбовский государственный технический университет», 2013.
5. Redko Y., Burda R., Dzhyoiev I., Redko V., Norchak S., Pavlovskiiy O. Numerical modeling of peat burning processes in a vortex furnace with countercurrent swirl flows. *Thermal*

Science. 2020. P. 158–177. URL: <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R> (Last accessed: 20.10.2022).

6. Рябов Г. А. и др. Опыт сжигания различных видов биомассы в России и Белоруссии. *Электрические станции*. 2015. № 9 (1010). С. 9–7.

7. Кроу Д. Численные модели течений газа с наибольшим содержанием частиц. Т. 3. Теоретические основы инженерных расчетов. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1982. 104, № 3. С. 114–122.

8. Launder B. E., Spalding. D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London : Academic Press, 1972. 169 p.

9. Jones. Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows: A Review. *Combust. Flame*. Whitelaw, 1982. 187 p.

10. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1978. 372 с.

11. Badzioch S., Hawksley P. G. W. Kinetics of Thermal Decomposition of Pulverized Coal Particles. *Ind. Eng. Chem. Process Design and Development*, 1970. 521 p.

12. Hong G., Paul G., Arias A. et al. Direct numerical simulations of statistically stationary turbulent premixed flames. *Combustion Science and Technology*. 2016. Vol. 188, is. 8. P. 1182–1198. URL: <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1198789> (Last accessed: 17.10.2022).

Алфьоров Сергій Олександрович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів, Харківський Національний університет будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0003-3451-1004. E-mail: Sergey.alf312@gmail.com.

Alforov Serhii, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0003-3451-1004. E-mail: Sergey.alf312@gmail.com.

Статтю прийнято 28.10.2022 р.

УДК 69-628.8

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДЯНИХ СИСТЕМ ПРОМЕНЕВОГО ОПАЛЕННЯ

Аспірант О. О. Синіло

IMPROVING THE EFFICIENCY OF USING WATER RADIANT HEATING SYSTEMS.

Postgraduate student O. O. Synilo

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273573>



Анотація. На сьогодні все більшого значення набуває питання захисту навколишнього середовища і скорочення кількості використання викопних невідновлювальних джерел енергії. Для сучасних систем опалення та кондиціонування обов'язкове скорочення викидів шкідливих речовин, особливо CO₂. Це можливо реалізувати шляхом значного скорочення використання викопних невідновлювальних видів палива та реконструкції інженерних систем до сучасного рівня енергозбереження. Щорічне зростання попиту на викопне паливо буде скорочуватися за допомогою оптимізації теплових пунктів і приладів розподілу тепла, що є необхідним кроком для розвитку промисловості та економіки країни. Тому зараз

головним завданням є підвищення енергетичної ефективності використання ресурсів і збільшення потенціалу альтернативних видів енергії в поєднанні з сучасними низькотемпературними енергоефективними системами розподілу тепла, одними з яких є променеві водяні панелі. У статті наведено результати вдосконалення методики монтажу променевих стельових приладів відносно їхньої орієнтації в просторі. Результати чисельних розрахунків вказують на ефективність монтажу обладнання під кутом 45 градусів, що збільшує ефективність на 10 % відносно орієнтації 0°.

Ключові слова: променеве опалення, енергозбереження, низькотемпературна система опалення, енергоефективність.

Abstract. Now, the issue of protecting the environment and reducing the use of fossil non-renewable energy sources is becoming increasingly important. For modern heating and air conditioning systems, it is imperative to reduce emissions of harmful substances, especially CO₂. This can be realized by significantly reducing the use of fossil non-renewable fuels and reconstructing engineering systems to the current level of energy saving. The annual growth in demand for fossil fuels will be reduced through the optimization of substations and heat distribution devices, which is a necessary step for the development of the country's industry and economy. Therefore, today the main task is to increase the energy efficiency of the use of resources and increase the potential of alternative types of energy in combination with modern low-temperature energy-efficient heat distribution systems, one of which is radiant water panels. The advantages of radiant heating are the absence of dust transfer, since the convective process of mixing air masses is remote, does not require the connection of electrical power, it is possible to work with low-temperature sources of heat supply, no maintenance is required, since there are no fans, electric motors, bearings, lubricants, filters, etc. The main advantage can be distinguished from the use of additional equipment for destratification, as there is no overheating of the upper zones of the heated building. The article presents the results of improving the method of mounting beam-ceiling fixtures with respect to their orientation in space. The results of numerical calculations indicate the efficiency of mounting the equipment at an angle of 45 degrees, which increases the efficiency by 10 % in relation to the 0° orientation. By achieving this mounting and installation option, the required capacity of the heat supply source is reduced and the amount of energy resources used is reduced.

Keywords: radiant heating, energy saving, low-temperature heating system, energy efficiency.

Вступ. Актуалізація питань покращення ефективності роботи систем розподілу тепла є ключовою в наш час. Використання низькотемпературних водяних променевих систем опалення – один з енергоефективних і сучасних варіантів.

Якщо розглядати сучасні конвекційні системи розподілу опалення в приміщеннях, можна помітити питання перегріву верхніх зон, не використовувані людиною [1]. Цей фактор призводить до витрат енергетичних ресурсів, підвищення потужності джерела тепла та зменшення його корисної дії, особливо якщо говорити про низькотемпературні джерела

теплоносія, у яких коефіцієнт перетворення теплоти (COP – Coefficient of Performance) висвітлює залежність потужності від зовнішньої температури повітря [2].

Переваги використання кліматичних променевих панелей – відсутність перегріву верхніх зон приміщень, шуму роботи, необхідності в технічному обслуговуванні (підшипники, мастило), конвекційного перенесення пилу та зниження пікового навантаження на джерело тепла, що у свою чергу зменшує витрати при визначенні потужності системи та підборі обладнання [3-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Раціональне та обґрунтоване застосування технологій променевого опалення дає змогу зменшити кількість використання ресурсів і використовувати тепловий потік направлено (робоча зона, вхідна група тощо), де є необхідність, при цьому зменшити використання корисної площі будівлі, оскільки основне обладнання розміщується під стелею.

Якість системи опалення значною мірою залежить від того, як тепло для неї може бути отримано та передано до споживача. Тобто необхідна можливість направити тепловий потік так, щоб його можна було використовувати там, де воно найбільш потрібне в конкретний час. Основним потенціалом енергозбереження при поверхневому опаленні є правильний вибір системи теплопередачі.

За даними досліджень, опублікованими німецькою компанією під

керівництвом Хайнц Бака [6], у 2017 році було проведено аналіз ключових розрахункових факторів променевого опалення та виділено такі, як сприйняття людиною температури, розподіл теплового потоку по висоті, час реакції системи на зміни температурних коливань ззовні та загальна керованість системою, температурний графік джерела теплопостачання.

Важливим фактором необхідно виділити те, що променеве опалення ефективно працює при температурі теплоносія від 30 °С, що у свою чергу є важливим техніко-економічним показником і дає змогу використовувати їх у комбінації з тепловими насосами. За допомогою такого комплексного підходу стає можливим реалізувати енергоефективне інженерне рішення.

Потенціал збереження теплової енергії, що включає низку факторів, наведено на рис. 1.

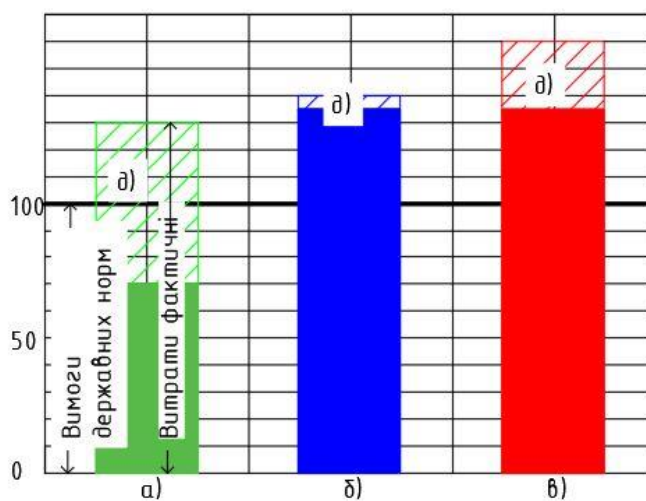


Рис. 1. Схема потенціалу збереження теплової енергії при використанні променевого опалення: а – користь використання; б – розподіл теплової енергії; в – генерація теплоносія; д – потенціал збереження

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є чисельне дослідження впливу кута нахилу променевої стельової панелі на його

ефективність відносно приміщення, у яке спрямовується тепловий потік.

Основна частина дослідження. Припущено, що зміна кута нахилу відносно горизонтальної площини призводить до

перерозподілу конвекційної складової роботи променевого опалення, що складає 30 % загальної теплової потужності [7]. Нижче наведені схеми на рис. 2 можливого використання панелей. Особливу увагу потрібно приділити приміщенням аркового типу, наприклад спортивні арени, ангари і тому подібне.

Для виконання дослідження, яке б висвітлювало поведження ефективності променивих панелей українського виробництва відносного кута їх нахилу, було взято три модулі довжиною 6 м,

ширина одного 0,396 м, висота 0,04 м. Усередині вбудовані чотири циркуляційні трубки з оцинкованої сталі, внутрішній діаметр яких 12 мм, над трубами розміщено ізоляційний шар мінеральної вати товщиною 40 мм, поверх якого знаходиться шар алюмінієвої відбивальної пластини [8]. Група чотирьох циркуляційних труб по подавальному та зворотному трубопроводах об'єднуються в колектори, на яких одна зовнішня нарізь діаметром 25 мм для під'єднання до джерела тепlopостачання.

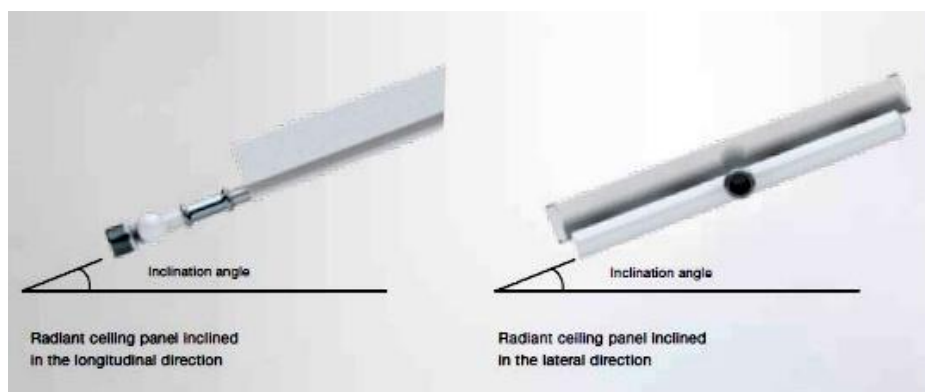


Рис. 2. Схема варіанта монтажу

Кліматичні панелі монтуються до стелі за допомогою підвісів, у складі яких були талрепи, за допомогою яких можна змінювати кут нахилу обладнання.

Потужність одного модуля з двома колекторами при розрахунковому температурному графіку системи 65/60 °C складала 1658 Вт, за паспортом обладнання. Як джерело тепlopостачання використовувався тепловий насос «Повітря-вода» модель 12 кВт [9].

Тепловтрати приміщення склалися з таких огорожувальних конструкцій: вікно однокамерне 2,8 м², зовнішні стіни – 3 шт, загальною площею 124 м² і становили 4212 Вт при зовнішній температурі повітря -12 °C [10]. Були встановлені однакові температурні вимоги до приміщення, а саме початкова температура нагріву 8 °C, час заміру – 1 год. Основним завданням

було проаналізувати витрати теплоносія за однаковий проміжок часу при різних похилих площах 0, 15, 30 та 45 ° і зафіксувати кінцеву температуру приміщення.

Стельові променеві панелі опалення розташовуються на відстані 1,5 м до стелі та 7 м від рівня чистої підлоги, датчик температури повітря встановлено на висоті 1,6 м.

Як прилади для аналізу результатів дослідження використовувалися годинник, цифровий термостат з дисплеєм і датчиком температури сприйняття (середня між температурою повітря та випроміненням), дані з якого були зняті і передані на контролер, витратомір механічний.

Результати чисельних розрахунків наведено в таблиці.

Результати розрахунків

Параметр, одиниця вимірювання	Кут нахилу обладнання, град			
	0	15	30	45
Потужність обладнання, Вт	3627	3627	3627	3627
t1, °C	65	65	65	65
t2, °C	60	60	60	60
G, кг/год	156	156	156	156
Температура внутрішня початкова, °C	8,2	8,8	8,3	8,9
Початкова температура поверхонь у приміщенні, °C	8,4	8,6	8,2	8,1
Час заміру, хв	60	60	60	60
Кінцева температура поверхонь у приміщенні, °C	8,4	8,6	8,2	8,1
Кінцева температура за термостатом °C	12,3	12,7	13,1	13,8
Кінцева температура повітря приміщення, °C	11,2	11,5	11,9	12,3
Ефективність відносно кута нахилу 0°C	-	3	6,5	10

Результати проведених досліджень показують ефективність зміни кута нахилу відносного горизонтального розміщення, при якому променева панель опалення розташовується під кутом 0° відносно підлоги, різниця в остаточних результатах досліджу становить 10 %.

Кінцеві показники показали, що залежність орієнтації клімат-панелі лінійно пов'язана з ефективністю її використання.

Отриманий результат можна охарактеризувати як ефект від перенесення теплового потоку конвекційної складової опалювального обладнання до його більш віддалених частин вгору відносно нижньої відмітки підвішування та подальшого поглинання корпусом панелі. При цьому

енергія не втрачається на нагрів верхніх шарів приміщення [11].

Використання такого варіанта монтажу можливе тоді, коли випромінювачі нахилені в бічному або повздовжньому напрямку.

Нахил панелі збільшує потужність відповідно до отриманих коефіцієнтів (таблиця). Збільшення кута нахилу необхідно враховувати і при обчисленні масових витрат, що впливає на опір системи.

Максимально допустимий кут нахилу залежить від технології підвішування та геометричних параметрів приміщення [12].

Ефект перенесення конвекційного теплового потоку показано на рис. 3, що висвітлює процес, який відбувається при активній опалювальній фазі.

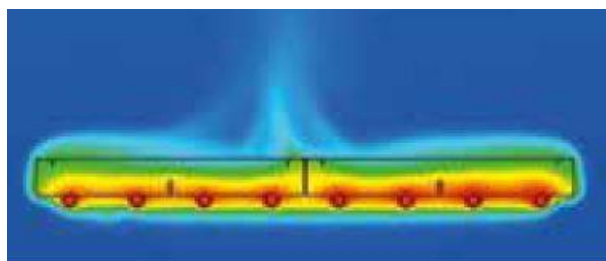


Рис. 3. Процес опалення променевим опаленням на динамічному тепловізорі

Отже, було зменшено втрати від конвекційної складової на 10 % і підвищено загальну ефективність використання теплової енергії.

Висновки. Результати розрахунків і замірів показують, що використання промислового опалення в бічному або повздовжньому напрямку під різними кутами дозволяють значно зменшити затрати енергетичних ресурсів на опалення при низькотемпературному режимі та при цьому не

втратити швидкодію на зміну зовнішніх температурних параметрів. Найбільш ефективним з проведених варіантів дослідження виявився варіант підвішування під кутом 45 °, при якому було виявлено збільшення ефективності на 10 % за кінцевими температурами, що у свою чергу дає змогу зменшити використання теплової енергії та кількість необхідного обладнання при проєктних розрахунках. При цьому труднощів монтажу виявлено не було.

Список використаних джерел

1. Миссенар Ф. А. Лучистое отопление и охлаждение. Москва: Гостройиздат, 1961. С. 266–293.
2. Heat Pumps. International energy agency. URL: <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (last access : 11.03.2022).
3. Holst S. Simmonds P. Kühlkonzepation am Beispiel Flughafen. 21st International Velta-Kongres. Bangkok, St.Christoph/Tirol. 1999. 2 p.
4. ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment, analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/39155.html> (last access: 17.09.2022).
5. Simmonds P., Gaw W., Holst S., Reuss S. Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions. *Flack+Kurtz Consulting Engineers*. San Francisco, CA (US), 2000. 929 p.
6. Zehnder Group Germany GmbH. URL: <https://www.zehnder-systems.de/> (last access : 11.03.2022).
7. Богословский В. Н. Строительная теплофизика теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Москва: Высш. шк., 1982. С. 415–416.
8. EFFI Company. Water climate panels. URL: <https://effi.com.ua/> (last access : 11.03.2022).
9. Nibe Company Sweden. Heat pumps technical documentation. URL: <https://nibe.ua/> (last access : 17.03.2022).
10. Захаревич А. Э. Особенности формирования микроклимата отапливаемых помещений. *Сборник статей репозиторий БНТУ*. 2018. С. 24–28.
11. Bjarne P. Using building mass to heat and cool. *ASHRAE Journal*. 2012. P. 44–46. URL: <https://orbit.dtu.dk/files/7757908/F5901d01.pdf>.
12. DIN 1946 :1994 Raumluftechnik Teil 2. Berlin: Deutsches Institut für Normung. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-1946-2/2204739> (last access : 19.09.2022).

Синіло Олег Олександрович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів, Харківський Національний університет будівництва та архітектури. ORCID iD: 0000-0002-1281-3477. Тел.: +38 (063) 418-42-74. E-mail: trapacana@gmail.com.

Synilo Oleh, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0002-1281-3477. Tel.: +38 (063) 418-42-74. E-mail: trapacana@gmail.com.

Статтю прийнято 12.12.2022 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 72.036:620.9

СУЧАСНА АРХІТЕКТУРА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Д-р техн. наук О. І. Філоненко, кандидати техн. наук О. І. Юрін, Н. М. Магас,
канд. арх. В. В. Руденко, канд. техн. наук П. О. Семко, студ. Б. С. Токар

MODERN ARCHITECTURE AND ENERGY EFFICIENCY

Dr. Sc. (Tech.) O. Filonenko, PhD (Tech.) O. Yurin, PhD (Tech.) N. Mahas,
PhD (Arch.) V. Rudenko, PhD (Tech.) P. Semko, student B. Tokar

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273592>



Анотація. У статті проведено аналіз конструктивних рішень зовнішніх стін житлових будівель, зведених у 2020-2022 роках у місті, яке належить до II температурної зони України. Зовнішні огорожувальні конструкції та внутрішні, що розділяють приміщення з різницею температур 4 °С і більше, мають недостатню товщину утеплення. Не враховується при розробленні заходів з утеплення вплив фільтрації повітря крізь стінові конструкції з легких матеріалів. Не виконуються вимоги щодо утеплення складних конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій для попередження утворення «містків холоду». Світлопрозорі конструкції, які займають понад 50 % фасадів, найдешевші та мають опір теплопередачі менший за мінімально допустиме значення. За результатами проведеного аналізу визначено основні заходи підвищення енергоефективності житлових багатопверхових будівель.

Ключові слова: житловий будинок, застосування фасаду, утеплення.

Abstract. The article analyzes the design solutions for the outer walls of residential buildings built in 2020-2022 in a city that belongs to the II temperature zone of Ukraine. The outer walls of the monolithic reinforced concrete frame of the building are made of hollow brick 250 mm thick with a façade system of heat-insulating and finishing class A. A verification thermotechnical calculation of the outer wall was carried out, taking into account heat-conducting inclusions, the reduced heat transfer resistance of an opaque enclosing structure (wall) does not correspond to the minimum allowable value of heat transfer resistance of the corresponding structure according to DBN V.2.6 – 31:2016 for the II temperature zone. When taking into account the effect of air permeability on reducing the overall level of thermal protection of the fence, it was determined that the calculated reduced value of the resistance to heat transfer of the outer wall will be even lower due to the fact that the structure consists of light cellular materials with a significant breathability. External enclosing structures and internal, dividing rooms with a temperature difference of 4 °C or more, have insufficient insulation thickness. When developing insulation measures, the effect of air filtration through wall structures made of lightweight materials is not taken into account. The requirements for the insulation of complex structural units of enclosing structures to prevent the formation of "cold bridges", for example, a balcony slab, are not met. Translucent structures, which occupy more than 50% of the facades, are the cheapest, their heat transfer resistance is less than the minimum allowable value. Based on the results of the analysis, the main measures to improve

the energy efficiency of residential multi-storey buildings were identified to enable the installation of large windows in residential and public buildings in the climatic conditions of Ukraine.

Keywords: residential building, facade glazing, insulation.

Вступ. У сучасній архітектурі житлових і громадських будівель виділяються фасади з коефіцієнтом засклення понад 0,5. Це пов'язано з поширенням монолітних залізобетонних каркасів при зведенні багатоповерхових будівель, що змінили призначення зовнішніх стін. Вони стали огорожувальними конструкціями, які несуть лише власну вагу в межах одного поверху. Виконуються зовнішні стіни з легких штучних каменів (цегла або газоблок) з зовнішнім ефективним утепленням або із світлопрозорих конструкцій. Це скорочує витрати на зведення будівельних конструкцій (первинні витрати), але в разі збільшує витрати на експлуатацію будівлі – її опалення та охолодження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Українські норми з енергоефективності постійно оновлюються та збільшують вимоги до мінімально допустимого значення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. Методики розрахунку тепловологісного стану огорожувальних конструкцій постійно уточнюються та дозволяють попередити теплові відмови в елементах будівлі будь-якої складності [1-5]. Але в Україні не

працює система контролю за якістю будівельних робіт на стадії зведення будівлі та введення її в експлуатацію. Тому сучасні будівлі не відповідають навіть мінімальним вимогам з енергоефективності. Дослідженням оптимального співвідношення площі стін і вікон з умов забезпечення вимог енергоефективності розглянуто в роботах [6-9], загальні питання енергоефективності будівель – у роботах [10, 11].

Визначення мети та завдання дослідження. В Україні бракує фахівців з виконання робіт з улаштування теплоізоляції в будівлі, тому більшість будівель, зведених навіть в останнє десятиріччя, не відповідають сучасним вимогам з енергоефективності. У них спостерігаються невідповідність мікрокліматичних параметрів нормативним величинам, утворення конденсату і, як наслідок, чорної плісняви на внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій, промерзання віконних укосів, понаднормові енерговитрати на опалення взимку і охолодження влітку. Це пов'язано як із низькою якістю виконання будівельно-монтажних робіт, так і помилками на стадії проектування (рис. 1).



Рис. 1. Примикання балконної плити та балконного блока будівлі, зданої в експлуатацію

Мета роботи та задачі дослідження – визначити основні заходи підвищення енергоефективності житлових багатоповерхових будівель за аналізом архітектурних і будівельних рішень сучасної забудови останніх років.

Основна частина дослідження. У сучасному будівництві поширення монолітних залізобетонних каркасів при зведенні багатоповерхових будівель дозволило скоротити первинні будівельні витрати. Перевагою такої конструктивної

системи є більш вільне об'ємно-планувальне рішення та широкі можливості з рішення фасадів. Використання каркаса змінило призначення зовнішніх стін. Вони стали огорожувальними конструкціями, які несуть лише власну вагу в межах одного поверху. Виконуються зовнішні стіни з легких штучних каменів (цегла або газоблок) з зовнішнім ефективним утепленням або із світлопрозорих конструкцій (рис. 2).



Рис. 2. Каркасні житлові будівлі на стадії зведення

Проведено аналіз конструктивних рішень зовнішніх стін житлових будівель, зведених у 2020-2022 роках, у місті, що належить до II температурної зони України. Зважаючи на те, що зведення будівель, а отже, і їхнє проектування розпочалося до набуття чинності ДБН В.2.6-31:2021 [1], авторами проаналізовано відповідність конструктивних рішень вимогам ДБН В.2.6-31:2016 [2]. Зовнішні стіни виконано з пустотілої цегли товщиною 250 мм з системою фасадною тепло-

ізоляційно-опоряджувальною класу А: СФТО - А1 - М049 - 100 - КД - ДСТУ Б В.2.6-36:2008.

Перевірочний теплотехнічний розрахунок зовнішньої стіни проведено з урахуванням теплопровідних включень за розрахунковою схемою на рис. 3.

Товщина і теплопровідність шарів огорожувальної конструкції наведена в таблиці. Нумерація шарів – від внутрішньої поверхні огороження.

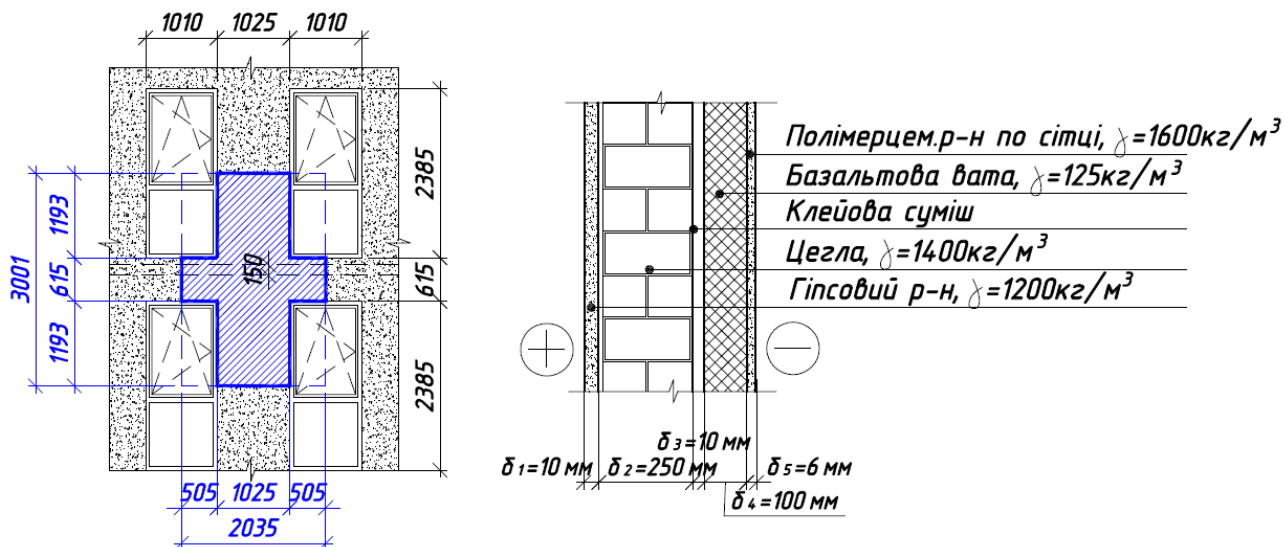


Рис. 3. Розрахункова схема огорджувальної конструкції

Таблиця

Характеристика шарів огорджувальної конструкції

Номер	Найменування	Товщина, м, по ділянці	Теплопровідність, Вт/(м·К)
1	Гіпсовий розчин	0,01	0,47
2	Цегла	0,25	0,58
3	Клейова суміш	0,01	0,93
4	Утеплювач	0,10	0,049
5	Шар опорядження	0,006	0,93

Визначено опір теплопередачі термічно однорідної огорджувальної конструкції за формулою (2) ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [3]: $R_{\Sigma} = 2,7 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

Визначаємо приведений опір теплопередачі з урахуванням теплопровідних включень та існуючої товщини утеплювача за формулою

$$R_{\Sigma \text{пр}} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^m k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k \cdot N_k} =$$

$$= \frac{3,7}{\frac{3,7}{2,7} + 0,081 \times 1,01 + 0,059 \times 1,01 + 0,068 \times 4,77 + 0,094 \times 2,035 + 0,0015 \times 22} =$$

$$= 1,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт},$$

де $k_1; k_2; k_3; k_4$ – лінійні коефіцієнти теплопередачі, Вт/(м·К), відповідно віконного відкосу в зоні перемички,

підвіконня, рядового примикання та конструкції перекриття, визначають за дод. Г ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [3],

$$k_1 = 0,081 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); k_2 = 0,059 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); k_3 = 0,068 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \\ k_4 = 0,094 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$L_1; L_2; L_3; L_4$ – лінійний розмір (проекція) лінійного теплопровідного включення (віконного відкосу в зоні перемички, підвіконня, рядового примикання та конструкції перекриття) за схемою рис. 3, м;

Ψ_1 – точковий коефіцієнт теплопередачі дюбеля для кріплення утеплювача, $\text{Вт}/\text{К}$, визначають за табл. Д.1 ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [3];

$$\Psi_1 = 0,0015 \text{ Вт}/\text{К};$$

N_k – загальна кількість точкових теплопровідних включень, шт.,

$$N_k = F_{\Sigma} \times n_d = 3,7 \times 6 = 22 \text{ шт.},$$

де n_d – кількість дюбелів на 1 м^2 огорожувальної конструкції, приймаємо $n_d = 6$.

Тобто приведений опір теплопередачі непрозорі огорожувальної конструкції (стіни) не відповідає мінімально допустимому значенню опору теплопередачі відповідної конструкції за табл. 3 ДБН В.2.6 – 31:2016 [2] для II температурної зони:

$$R_{\Sigma \text{пр}} = 1,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} < R_{g \text{min}} = 2,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}.$$

Для відповідної конструкції стіни товщина утеплення мала б бути

$$\delta_4 = \lambda_{4p} \left(\frac{R_{q \text{min}} \cdot F_{\Sigma}}{F_{\Sigma} - R_{q \text{min}} (\sum_{j=1}^m k_j L_j + \sum_{k=1}^K \Psi_k \cdot N_k)} \right) - \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{\alpha_3} = \\ = 0,049 \left(\frac{2,8 \times 3,7}{3,7 - 2,8(0,081 \times 1,01 + 0,059 \times 1,01 + 0,068 \times 4,77 + 0,094 \times 2,035 + 0,0015 \times 22)} - \frac{0,01}{0,47} - \frac{0,25}{0,58} - \frac{0,01}{0,93} - \frac{0,006}{0,93} - \frac{1}{8,7} - \frac{1}{23} \right) = 0,257 \text{ м}$$

Тобто для компенсації тепловтрат внаслідок значного коефіцієнта застосування фасадів (площа вікон у 2-3 рази перевищує необхідну за вимогами освітлення) необхідно на стіни улаштувати утеплювач товщиною не менше 250 мм. Утеплення товщиною 100 мм не відповідає вимогам енергоефективності навіть по основному полю (рис. 4).

Конструкції самонесучих зовнішніх стін з легких матеріалів (цегла або газоблок) з зовнішнім утепленням мають значну повітропроникність. Фільтрування

холодного зовнішнього повітря в огороженнях викликає збільшення втрат теплоти і зниження температури в товщі стіни за рахунок того, що частина тепла, яка проходить крізь огорожувальну конструкцію, витрачається на нагрів повітря, що фільтрується. В українській нормативній літературі методика визначення впливу повітропроникності на загальний рівень теплозахисту будинку оновлення не отримала. Але в більш старішій літературі цей вплив можна оцінити формулами (1)-(3).

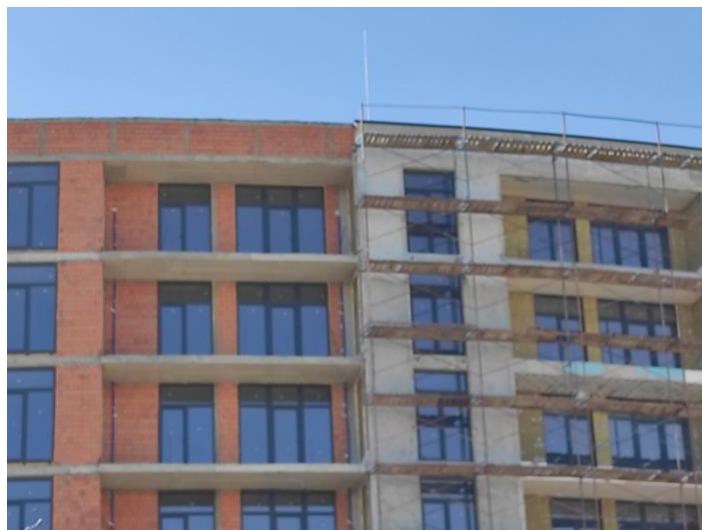


Рис. 4. Утеплення зовнішніх стін мінеральною ватою товщиною 100 мм

Коефіцієнт r враховує вплив повітропроникності на зниження загального рівня теплозахисту огороження та визначається за формулою

$$r = \frac{R_{\Sigma}^n}{R_{\Sigma}} = \frac{Q}{(Q+Q^n)}, \quad (1)$$

де R_{Σ}^n – опір теплопередачі огороження з урахуванням зниження за рахунок перенесення тепла, що фільтрується через огороження повітрям, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$;

R_{Σ} – опір теплопередачі огороження по основному полю, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$;

Q – кількість тепла, що проходить крізь огороження без урахування теплопровідних включень, $\text{Вт}/\text{m}^2$,

$$Q = (t_{\text{вн}} - t_{\text{зн}}) \cdot R_{\Sigma}, \quad (2)$$

де $t_{\text{вн}}, t_{\text{зн}}$ – розрахункова температура внутрішнього і зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$;

Q^n – кількість тепла, що переноситься фільтруючим повітрям крізь огороження, $\text{Вт}/\text{m}^2$,

$$Q^n = G \cdot c_p \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зн}}) \cdot A_k / 3,6, \quad (3)$$

де G – масова повітропроникність огороження, $\text{кг}/(\text{m}^2 \cdot \text{год})$, що визначається відповідно до ДСТУ-Н Б В.2.6-191:2013 [4];

c_p – середня теплоємність повітря при постійному тиску, що дорівнює $1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;

A_k – коефіцієнт, що враховує нерівномірність і вплив зустрічного теплового потоку, дорівнює $0,6$.

Відповідно для зовнішньої стіни за розрахунковою схемою рис. 2.

$$Q = (20 + 19) \cdot 2,72 = 106,08 \text{ Вт}/\text{m}^2,$$

$$Q^n = 0,66 \cdot 1,005 \cdot (20 + 19) \cdot 0,6/3,6 = 4,31 \text{ Вт}/\text{m}^2,$$

$$r = 106,08/(106,08 + 4,31) = 0,96.$$

Тобто визначене приведенне значення опору теплопередачі зовнішньої стіни $R_{\Sigma}^{np} = 1,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ буде ще нижче за рахунок того, що конструкція складається з легких пористих матеріалів зі значним повітропроникненням.

Конструкцію вікна складають п'ятикамерна профільна система з заповненням двокамерними склопакетами 30 мм з двома шарами енергозберігаючого скла з заповненням повітрям двох камер. Без заповнення камер склопакета аргоном або криптоном вікна будуть мати мінімально допустиме значення опору теплопередачі.

Ще один аспект сучасного будівництва – це неопалювані сходові марши. В аналізованих будівлях індивідуальне поквартирне опалення. Стіна між квартирою і неопалюваним сходовим маршем складається з пустотілої цегли товщиною 250 мм з оздобленням з обох боків штукатурним розчином без утеплення. Хоча, за вимогами п. 6.1 ДБН В.2.6–31:2016 [2], внутрішні конструкції, що розділяють приміщення, температура в яких відрізняється на $4 \text{ }^\circ\text{C}$ і більше, мають бути утеплені. На час обстеження температура повітря на сходах була близько $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Висновки. Значна частина нових будівель, що здаються в експлуатацію в останні роки, не відповідають мінімальним вимогам з енергоефективності. Зовнішні огорожувальні конструкції та внутрішні, які розділяють приміщення з різницею температур $4 \text{ }^\circ\text{C}$ і більше, мають недостатню товщину утеплення. Не враховується при розробленні заходів з утеплення вплив фільтрації повітря крізь стінові конструкції з легких матеріалів. Не виконуються вимоги з утеплення складних конструктивних вузлів огорожувальних конструкцій для попередження утворення «містків холоду», наприклад балконної плити. Світлопрозорі конструкції, що займають понад 50 % фасадів, найдешевші та мають опір теплопередачі менший за мінімально допустиме значення. Тому

виникає питання щодо відповідності енергопаспорта на стадії проектування нових будівель і проходження експертизи проектної документації, а також відповідності енергосертифіката на стадії введення будівлі в експлуатацію.

Сучасний напрям щодо улаштування великих вікон у житлових і громадських будинках може існувати в кліматичних умовах України за певних умов.

По-перше, коефіцієнт застосування фасаду має відповідати рівню енергоефективності будівлі в цілому. Значний вплив лінійних розмірів теплопровідних включень (віконного відкосу в зоні перемички, підвіконня, рядового примикання) має компенсуватися відповідною товщиною утеплення по основному полю стін і якісним виконанням утеплення укосів.

По-друге, конструкція вікна має бути енергоефективною. Наприклад, світлопрозорі конструкції (вікна) з п'ятикамерною профільною системою Steko S450 із заповненням двокамерними склопакетами 30 мм з двома шарами енергозберігаючого скла з заповненням аргоном двох камер – 4MDS-9Ar-4-9Ar-4i. Приведений опір теплопередачі вікна, за протоколом випробовувань 006к/18 (ДП НДІБК), становить $0,88 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

По-третє, необхідно обов'язково встановлювати зовнішні ролети для захисту приміщення від охолодження взимку та перегріву влітку, що мають закриватися в період невикористання приміщення. Це дасть змогу підтримувати оптимальні кліматичні умови всередині приміщення пасивними заходами.

Перераховані заходи дадуть змогу скоротити зону значного дискомфорту біля вікон, але не виключити її взагалі. Тому надаючи перевагу вікнам, площа яких перевищує вимоги освітлення (рис. 5), ми створюємо дискомфортні мікрокліматичні умови та збільшуємо експлуатаційні витрати в будівлі задля сучасного інтер'єру та екстер'єру.



Рис. 5. Житлові будинки зі значним коефіцієнтом скління фасадів

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинні від 2022-09-01. Київ: Мінрегіон України, 2022. 23 с.
2. ДБН В.2.6-31:2016. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель. Київ: Мінрегіон України, 2016. 30 с.
3. ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Чинний від 2014-01-01. Київ: Мінрегіон України, 2014. 51 с.
4. ДСТУ-Н Б В.2.6-191:2013. Настанова з розрахункової оцінки повітропроникності огорожувальних конструкцій. Чинний від 2014-01-01. Київ: Мінрегіон України, 2014. 13 с.
5. ДСТУ-Н Б В.2.6-192:2013. Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій. Чинний від 2014-01-01. Київ: Мінрегіон України, 2014. 37 с.
6. Ayşe Fidan Altun. Determination of Optimum Building Envelope Parameters of a Room concerning Window-to-Wall Ratio, Orientation, Insulation Thickness and Window Type. *Buildings*. 2022. 12(3), 383. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12030383> (last access: 08.09.2022).
7. Derya B. Özkan, Cenk Onan. Optimization of insulation thickness for different glazing areas in buildings for various climatic regions in Turkey. *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Is. 4. P. 1331-1342. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.025> (last access: 08.09.2022).
8. Pal R. K. Thermal performance of an insulated and window area optimized house. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. Vol. 13, No. 4. P. 1090-1110.
9. Kwang-Ho An, Eun-Mi Hyun, Yong-Sik Kim. A Comparative Analysis of the Energy Load due to Window Area Ratio of Domestic Public Buildings. *KIEAE Journal*. 2015. Vol. 15. Is. 1. P. 21–27. URL: <https://doi.org/10.12813/kieae.2015.15.1.021> (last access: 08.09.2022).
10. Gennadiy Farenjuk, Olena Filonenko, Volodymyr Datsenko. Research on Calculation Methods of Building Envelope Thermal Characteristics. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 8, № 4.8. P. 97–102.
11. Філоненко О. І., Юрін О. І. Енергетична ефективність будинків. Полтава: Астроя, 2018. 484 с. URL: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17366.16961> (дата звернення: 08.09.2022).

12. ДСТУ Б В.2.6-36:2008. Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням штукатурками. Загальні технічні умови. Чинний від 2009-06-01. Київ : Мінрегіон України, 2009. 31 с.

Філоненко Олена Іванівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівництва та цивільної інженерії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0001-8571-9089. Тел.: +38 (066) 623-75-46. E-mail: olena.filonenko.pf@gmail.com.

Юрін Олег Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-9290-9048. E-mail: yurinoleg54@gmail.com.

Магас Наталія Миколаївна, кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри конструкцій будівель, Словацький технічний університет в Братиславі. ORCID iD: 0000-0002-4459-3704. E-mail: nataliia.mahas@stuba.sk.

Руденко Віктор Васильович, кандидат архітектури, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0001-7821-8147. E-mail: rudenkovv2020@gmail.com.

Семко Павло Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0002-5915-3082. E-mail: syomka7@gmail.com.

Токарь Богдан Станіславович, студент, група 201БМ, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0003-2925-3100. E-mail: Bogdan07771@gmail.com.

Filonenko Olena, Dr. Sc. (Tech.), professor, Department of Construction and Civil Engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0001-8571-9089. Тел.: +38 (066) 623-75-46. E-mail: olena.filonenko.pf@gmail.com.

Yurin Oleg, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Construction and Civil Engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-9290-9048. E-mail: yurinoleg54@gmail.com.

Mahas Nataliia, PhD (Tech), Researcher, Department of Building Construction, Slovak University of Technology in Bratislava. ORCID iD: 0000-0002-4459-3704. E-mail: nataliia.mahas@stuba.sk.

Rudenko Viktor, PhD (Arch), Associate Professor, Department of Construction and Civil Engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0001-7821-8147. E-mail: rudenkovv2020@gmail.com.

Semko Pavlo, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Construction and Civil Engineering, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0002-5915-3082. E-mail: syomka7@gmail.com.

Tokar Bohdan, student, Group 201BM, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID iD: 0000-0003-2925-3100. E-mail: Bogdan07771@gmail.com.

Статтю прийнято 16.11.2022 р.

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)

УДК 504.05:528.48:004.6

КОНЦЕПТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗИ ДАНИХ ГІС-МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОСЕЛЕНЬ

Канд. техн. наук В. І. Козарь, д-р техн. наук В. С. Бахарєв,
канд. біол. наук Н. П. Гальченко, канд. техн. наук Є. В. Дорожко

CONCEPTUAL MODELING OF THE DATABASE OF GIS MONITORING OF ELECTROMAGNETIC POLLUTION OF SETTLEMENTS

PhD (Tech.) V. Kozar, Dr. Sc. (Tech.) V. Bakhariev, PhD (Biol.) N. Halchenko,
PhD (Tech.) Y. Dorozhko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273613>



Анотація. У статті викладено результати моделювання бази геопросторових даних для моніторингу електромагнітного забруднення поселень. Під час досліджень проаналізовано предметну сферу моніторингу електромагнітного забруднення, сформовано базовий і профільний набори геопросторових даних для систем геоінформаційного моніторингу електромагнітного забруднення поселень. Запропонований варіант концептуальної моделі бази даних може бути основою фізичного моделювання системи моніторингу електромагнітного забруднення поселень.

Ключові слова: електромагнітне забруднення, моніторинг, концептуальна модель, геопросторові дані.

Abstract. The article presents the results of conceptual modeling of the geospatial database for monitoring electromagnetic pollution of settlements. Recently, the world has seen a rapid increase in the number of sources and the level of electromagnetic radiation. This can negatively affect people's health and their environment.

The analysis of the publications showed that today researchers have formed a theoretical base for assessing the impact of electromagnetic radiation on people and the environment, developed models of the propagation of electromagnetic waves, ways and methods of protection against their harmful effects. However, not enough attention has been paid to monitoring the electromagnetic pollution of settlements.

Systematic measurements of electromagnetic field levels are carried out only by individual EU countries. Systematic control of this type of pollution is not carried out in Ukraine, there are no regulatory documents regarding the procedure for its monitoring, but the maximum permissible levels of electromagnetic fields for the population are established.

Data on the distribution of electromagnetic fields are interdisciplinary in nature and necessarily contain an indication of the location of objects. For their effective processing, it is advisable to use geo-information technologies.

Based on the results of the analysis of the subject area of electromagnetic pollution monitoring, a conceptual data model was developed. It is described using UML tools. The model contains two sets of data. The basic set of geospatial data includes information about buildings of

various purposes, land plots, streets, highways, railways, engineering communications, relief, soils, hydrography, territory zoning, facility addresses. The profile set includes data on electromagnetic radiation sources and their sanitary protection zones, control points, the results of calculations and measurements of radiation parameters, the relative level of electromagnetic fields and the building restriction zones. The proposed model can be the basis of the physical modeling of the settlement's electromagnetic pollution monitoring system.

Keywords: *electromagnetic pollution, monitoring, conceptual model, geospatial data.*

Вступ. Останні кілька десятиліть в усьому світі спостерігається стрімкий розвиток радіоелектроніки. Багаточисельні лінії електропередач, промислове обладнання, об'єкти радіо- та телемовлення, станції мобільного зв'язку, транспорт, побутові та багато інших електроприладів є штучними джерелами електромагнітного випромінювання (ЕМВ). Кількість таких джерел і відповідно рівень ЕМВ постійно зростають, що впливає на електромагнітну обстановку територій і здоров'я людей. Результати вітчизняних і закордонних експериментальних досліджень свідчать про високу біологічну активність електромагнітних полів (ЕМП) в усіх частотних діапазонах. Значущість цих питань підтверджується тим, що в 1995 році Всесвітньою організацією охорони здоров'я було введено термін «глобальне електромагнітне забруднення довкілля», а проблему електромагнітного забруднення (ЕМЗ) включено до переліку пріоритетних проблем людства [1]. Проблема ЕМЗ є особливо актуальною в містах, для яких характерні насиченість різноманітними джерелами ЕМВ та висока щільність населення. За даними ООН, до 2050 року в містах житиме більше 2/3 населення планети [2].

Звичайно, людство не може відмовитися від таких благ цивілізації, як електропостачання, радіо- і телемовлення, мобільний зв'язок, електротранспорт тощо. Тому основним завданням є захист людей і довкілля від шкідливого впливу ЕМВ. Організація такого захисту передбачає в першу чергу оцінювання рівня ЕМЗ на основі достовірних даних про джерела випромінювання, особливості забудови

населеного пункту, кількість населення та інші чинники. Основою для об'єктивної оцінки є моніторинг. Тому питання організації і вдосконалення систем моніторингу ЕМЗ є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження впливу ЕМВ на довкілля проводилися за різними напрямками: вплив на людей і живі організми, гігієнічна оцінка, особливості поширення електромагнітних хвиль (ЕМХ), розроблення і вдосконалення способів і методів захисту, методологія та технологія моніторингу ЕМЗ, картографування та застосування геоінформаційних систем (ГІС) при здійсненні моніторингу ЕМЗ.

Найбільше досліджень проведено у сфері оцінювання впливу ЕМХ на живі організми. Встановлено, що в біологічних системах вплив ЕМВ викликає широкий спектр реакцій [3], які залежать від інтенсивності і частоти випромінювання, тривалості опромінення, періодичності дії та ін. До відхилень у здоров'ї людини, що були доведені, належать загальні симптоми (погіршення настрою, зниження працездатності та вербальних розумових здібностей, нестабільність температури тіла, головний біль, слабкість, швидка втомлюваність, поганий сон, алергічні реакції тощо) [4]; порушення нервової [5, 6], серцево-судинної [7, 8] та імунної [9] систем, розвиток злоякісних ракових утворень [10], розлади репродуктивної функції [11]. Більшість авторів відзначають, що особливо чутливі до несприятливого впливу ЕМВ ембріони та діти. Крім того, між вченими не припиняються дискусії щодо негативної дії ЕМВ на гени та фізіологію клітини [10].

ЕМВ негативно впливає також на інші живі організми. Результати ботанічних досліджень свідчать, що тривалий вплив магнітного поля може викликати різні біологічні ефекти на органічному, тканинному та клітинному рівнях [12, 13]. Зокрема, на клітинному рівні відбувається порушення біохімічних процесів, що призводить до пошкодження коренів рослин [14].

Багато публікацій присвячено гігієнічній оцінці ЕМЗ. Ці дослідження дозволили здійснити комплексне гігієнічне оцінювання стану ЕМЗ окремих міст [15], визначити небезпечні рівні ЕМВ і стали підґрунтям для встановлення гранично допустимих рівнів (ГДР) напруженості електричного і магнітного полів [16-18].

Продовжуються дослідження особливостей поширення ЕМХ. Вітчизняними та зарубіжними вченими були визначені закономірності розповсюдження ЕМХ у просторі [19, 20], розроблені моделі поширення ЕМХ [19, 21, 22], у тому числі тривимірні моделі, що враховують специфіку міського середовища [23]. Слід зазначити, що переважна більшість досліджень у цій сфері проводиться для планування та оптимізації бездротових мереж.

Важливим напрямом досліджень є розроблення і вдосконалення способів і методів захисту від ЕМЗ. Аналіз публікацій показав, що ефективним методом захисту є екранування випромінювань [24, 25]. Для створення екранів застосовують різні матеріали, а останні дослідження спрямовані на покращення їхніх властивостей [26] і розроблення нових матеріалів [27]. Однак екрани зменшують як штучні, так і природні ЕМП, що також може мати негативні наслідки для здоров'я людей [25]. Тому основним видом захисту залишається регламентація відстані від джерела випромінювання шляхом визначення санітарно-захисних зон.

Предметом багатьох досліджень є вдосконалення методології та технології

проведення моніторингу ЕМЗ. Дослідниками узагальнено концепції та методики моніторингу ЕМЗ [28-30], створено національні системи моніторингу ЕМП [31], удосконалено методи моніторингу ЕМЗ урбанізованих територій [32, 33], встановлено рівні ЕМВ на територіях окремих міст [34-36].

Окремо слід виділити публікації щодо картографування ЕМЗ і застосування геоінформаційних систем, що забезпечують наочне подання рівнів ЕМЗ території. Вченими обґрунтовано зміст і масштаб картографічних матеріалів залежно від потужності випромінювачів і вирішуваних завдань [37], оптимізовано щільність точок вимірювання рівня ЕМВ [38], доведено можливість застосування методів просторової статистики для оцінювання рівнів ЕМВ [39], узагальнено підходи до геоінформаційного моделювання ЕМЗ, запропоновано процедури та методології оцінювання рівнів ЕМВ за допомогою ГІС, створено прототипи систем моніторингу ЕМЗ на базі ГІС [40-42].

Отже, на сьогодні існує розвинена теоретична база для оцінювання впливу ЕМВ на людей і середовище їхнього існування, розроблені моделі поширення ЕМХ, способи та методи захисту від їхнього шкідливого впливу. Однак, на нашу думку, недостатньо уваги приділено питанням моніторингу ЕМЗ населених пунктів. Зокрема, відсутні науково обґрунтовані рекомендації до організації систем моніторингу ЕМЗ, не стандартизовані схеми баз даних моніторингу. При цьому точна інформація особливо важлива, коли потрібно оцінити можливі наслідки дії ЕМВ. Недостатня поінформованість може стати причиною негативної громадської думки та неприйняття впровадження нових технологій через чутки про шкоду для здоров'я. Тобто питання моделювання і проектування ГІС для моніторингу ЕМЗ залишаються актуальними.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою досліджень є створення концептуальної моделі бази геопросторових даних для організації та ведення моніторингу ЕМЗ населених пунктів. Для досягнення мети було проведено аналіз систем моніторингу ЕМЗ поселень як об'єкта інформатизації та розроблено концептуальну модель даних.

Основна частина дослідження. Вивчення стану діяльності з оцінювання ЕМП у різних країнах [28, 40] свідчить, що національні схеми організації та технічні рішення при здійсненні моніторингу ЕМЗ досить різноманітні. Більшість країн ЄС проводить вимірювання рівнів ЕМП радіочастотного діапазону, але переважно це діапазон частот, використовуваний системами стільникового мобільного зв'язку (300 МГц - 3 ГГц). В окремих країнах ЄС проводять вимірювання рівнів ЕМП у діапазоні надзвичайно низьких частот (0 Гц - 300 Гц), однак це скоріше винятки, ніж регулярні спостереження.

В Україні систематична діяльність у сфері моніторингу ЕМЗ не здійснюється, а вимірювання та картографування рівнів ЕМВ були виконані переважно як ініціативні наукові дослідження в окремих населених пунктах. Наразі в Україні

відсутні нормативні документи, що чітко регламентують правила організації та здійснення моніторингу ЕМЗ, для чинних норм характерна незгодженість деяких положень. Однак основні вимоги щодо контролю рівнів ЕМВ українським законодавством сформульовані. Чинними в Україні нормативно-правовими актами [43-45] встановлені ГДР для досить широкого діапазону частот ЕМВ. При цьому визначено, що ЕМП у діапазонах частот до 300 МГц оцінюється напруженістю поля, а в діапазонах частот від 300 МГц до 300 ГГц – поверхневою щільністю потоку енергії [44].

Для захисту населення від шкідливого впливу пристроїв електропередач змінного струму промислової частоти (50 Гц) ГДР напруженості електричних полів встановлені в межах від 0,5 до 20 кВ/м залежно від доступності об'єктів для людей [44]. ГДР напруженості електричних полів, створюваних радіотехнічними об'єктами при безперервному випромінюванні, подані в таблиці. ГДР поверхневої щільності потоку енергії, яку створюють такі об'єкти в діапазоні частот від 300 МГц до 300 ГГц, обмежено значенням 100 мкВт/см².

Таблиця

Гранично допустимі рівні напруженості електричних полів

Частоти, МГц	0,03-0,3	0,3-3	3-30	30-300
Гранично допустимі рівні, В/м	25	15	6-3	6

ГДР напруженості електричних полів, які створюють телевізійні радіостанції в діапазоні частот від 48 до 1000 МГц, нормують окремо і визначають за формулою [45]

$$E_{\text{ГДР}} = 21f^{-0,37},$$

де f – несуча частота оцінюваного каналу, МГц.

ГДР поверхневої щільності потоку енергії, створюваної радіолокаційними станціями (імпульсне та комбіноване випромінювання), залежать від частоти і режиму випромінювання і коливаються від 10 до 140 мкВт/см².

Для кількох джерел випромінювання, що працюють у різних радіочастотних діапазонах, визначають відносний рівень ЕМП, створюваний усіма джерелами, з урахуванням відповідних ГДР [44, 45].

Законодавством України [46] чітко визначено об'єкти і території, на яких необхідно вживати заходів щодо недопущення перевищення значень фізичних факторів, що можуть впливати на здоров'я людини. Нормами [43-45] також регламентовано вимоги щодо розміщення будинків і споруд, встановлення випромінюючого обладнання, створення санітарно-захисних зон, організації захисту від впливу ЕМП. Однак навіть найжорсткіші санітарно-гігієнічні обмеження не гарантують відсутності шкідливого впливу ЕМВ на городян. ЕМЗ урбанізованих територій досить складне у просторовому відношенні явище. Його формує велика кількість джерел випромінювання зі спрямованими та ізотропними антенами в умовах складної тривимірної структури середовища, що призводить до багатопроменевого поширення радіохвиль, чергування ділянок з прямою видимістю випромінюючих антен і зон радіотіні. Сьогодні в Україні контроль рівнів ЕМВ проводять здебільшого при встановленні нового випромінюючого устаткування або за зверненнями мешканців, а для об'єктивної оцінки екологічного стану потрібна достовірна інформація, джерелом якої є моніторинг.

Метою створення систем моніторингу ЕМЗ поселень є організація спостережень для отримання інформації про джерела випромінювання, рівні ЕМЗ, динаміку їхньої зміни і кількість населення, яке проживає на територіях з перевищеним рівнем ЕМЗ. Моніторинг ЕМЗ важливий для оцінювання інженерної інфраструктури, екологічної безпеки, дотримання санітарно-гігієнічних норм на урбанізованих територіях. Загалом проведення моніторингу ЕМЗ на території населених пунктів передбачає інвентаризацію джерел ЕМВ і захищених об'єктів з відображенням їх на планово-картографічних матеріалах, розрахунки та вимірювання рівнів ЕМВ, визначення об'єктів і територій з перевищенням ГДР

напруженості електричних полів і поверхневої щільності потоку енергії, розроблення рекомендацій щодо зниження шкідливого впливу ЕМП на мешканців.

За характером просторової локалізації джерела ЕМВ можна поділити на три типи: точкові, лінійні, площинні. Враховуючи розміщення у просторі та вимоги українських нормативно-правових актів щодо контролю рівня ЕМВ, можна сформулювати такі групи антропогенних джерел ЕМВ:

- 1) лінії електропередач та електрифікованого транспорту;
- 2) електроенергетичні промислові установки;
- 3) радіотехнічні системи;
- 4) телевізійні передавачі;
- 5) радіолокаційні засоби імпульсного випромінювання;
- 6) радіолокаційні засоби комбінованого випромінювання.

Лінії електропередачі створюють ЕМП промислової частоти (50 Гц), рівні яких можуть значно перевищувати середні рівні природних полів. Джерелами випромінювання енергії в навколишній простір є в цьому випадку дроти ЛЕП, рейки живлення потягів і сам рухомий склад. Такі об'єкти мають велику протяжність і утворюють мережі.

Електроенергетичні промислові установки можуть створювати ЕМП частотою до 3 кГц. Джерелами випромінювання такої групи є технологічне устаткування та дроти ЛЕП.

Радіотехнічні системи (засоби радіомовлення, радіонавігації, передачі команд телеуправління, обладнання радіорелейного, стільникового й тракінгового зв'язку тощо) працюють на частотах 3 кГц-40 ГГц. Вони можуть включати технічні будівлі з радіопередавачами та антенні поля, на яких розташовуються десятки антенно-фідерних систем. Антени встановлюють на висоті 15-100 м від поверхні землі на будівлях або щоглах. При встановленні їх на житлових

будинках обов'язково контролюють рівень ЕМВ.

Телевізійні передавальні станції зазвичай складаються з радіопередавачів і випромінювальної антени (на вежі або щоглі), з'єднаних фідерними лініями, і контрольно-вимірювальної апаратури. Такі об'єкти зазвичай випромінюють у діапазоні частот від 48 до 1000 МГц.

Радіолокаційні станції оснащені, як правило, антенами дзеркального типу та мають вузькоспрямовану діаграму випромінювання. Радіолокаційні системи імпульсного випромінювання можуть працювати на частотах від 500 МГц до 250 ГГц, комбінованого випромінювання – від 3 до 300 ГГц. Створюваний ними сигнал принципово відрізняється від випромінювання інших джерел, оскільки періодичне переміщення антени призводить до просторової переривчастості, а циклічність роботи радіолокатора (випромінювання/приймання) – до часової переривчастості опромінення.

Інвентаризація об'єктів і територій, на яких необхідно контролювати рівні ЕМП, важлива для визначення кількості та часу перебування людей у цих об'єктах. Визначені законодавством [46] захищені об'єкти можна поділити на такі типи:

– житлові будівлі (час перебування людей більше 8 год на добу);

– громадські будівлі (час перебування людей зазвичай менше 8 год на добу, але в закладах охорони здоров'я та освіти може бути більше 8 год, а відвідувачі часто є особливо чутливими до впливу випромінювання);

– виробничі будівлі (час перебування людей близько 8 год на добу, можуть бути розташовані в безпосередній близькості до джерел випромінювання);

– прибудинкові території житлових будівель (час перебування людей менше 8 год на добу);

– території рекреаційного призначення (час перебування людей менше 8 год на добу).

Розрахунки рівнів ЕМВ проводять для попередньої оцінки стану міського середовища та визначення місць інструментального контролю рівня ЕМЗ. Слід зазначити, що регламентовані нормами [45] методи розрахунків базуються на простих метриках (відстань до джерела випромінювання, пряма видимість) і лише наближено (шляхом введення коефіцієнтів) враховують характеристики реального середовища поширення ЕМХ. Для точнішої оцінки просторового розподілу ЕМП доцільно застосовувати теоретичні та емпіричні моделі поширення ЕМХ, що враховують тип рельєфу, багатопрорізне поширення, поглинання хвиль та інші характеристики середовища.

Нормативними документами [44] визначено, що вимірювання рівнів ЕМП проводяться суб'єктами господарювання, акредитованими на проведення таких досліджень. При цьому вимірювання проводять переважно при спорудженні чи реконструкції об'єктів, що випромінюють електромагнітну енергію. Під час моніторингу інструментальний контроль рівня ЕМЗ доцільно здійснювати на об'єктах і територіях, де за результатами розрахунків можливе перевищення ГДР напруженості електричних полів і поверхневої щільності потоку енергії. При вимірюванні параметрів ЕМП необхідно фіксувати місцезнаходження (координати) і висоту кожної контрольної точки. Наявність просторової складової в результатах розрахунків і вимірювань параметрів ЕМП дозволить використовувати функціональні можливості ГІС для оцінювання рівня ЕМЗ території та візуалізації його результатів.

Результати проведеного аналізу узагальнені в концептуальній моделі даних системи моніторингу ЕМЗ. Концептуальна модель описана засобами UML. Характер просторової локалізації об'єктів відображений відповідними піктограмами.

Модель передбачає формування двох наборів даних: базового і профільного.

До базового набору даних включені відомості про об'єкти, що є важливими для контролю рівня ЕМЗ на території поселень (рис. 1): будівлі, земельні ділянки, вулиці,

автошляхи, залізниці, інженерні комунікації, рельєф, ґрунти, гідрографію, зонування території, адреси об'єктів. Ця інформація може бути отримана з існуючих наборів просторових даних.

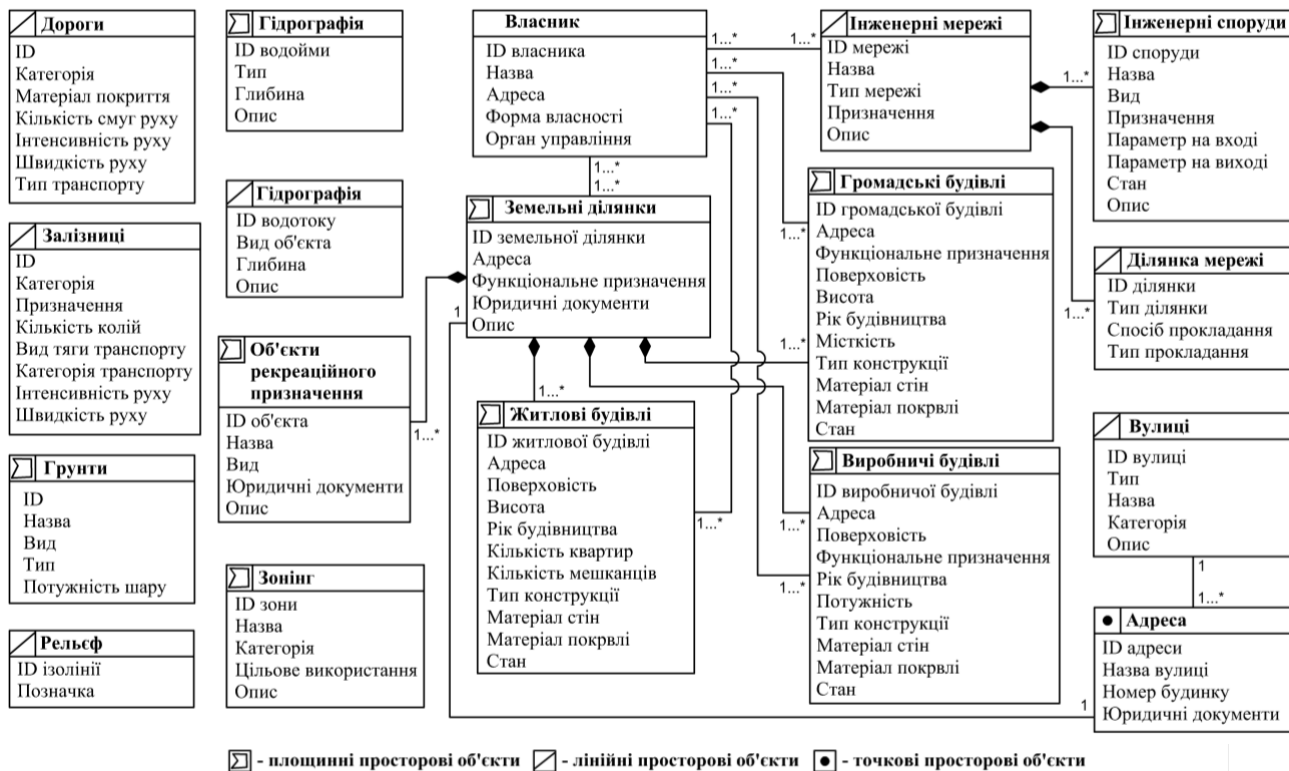


Рис. 1. Діаграма класів базового набору геопросторових даних системи моніторингу ЕМЗ населених пунктів

До профільного набору геопросторових даних (рис. 2) пропонується включити відомості про всі джерела ЕМВ і їхні санітарно-захисні зони, а також контрольні точки та результати розрахунків і вимірювання параметрів випромінювання, відносний рівень ЕМП та зони обмеження забудови

При цьому передбачено складання карт відносного рівня ЕМП як за результатами розрахунків згідно з затвердженою методикою [45], так і результатами вимірювання параметрів ЕМП, створюваних усіма джерелами на

території населеного пункту. Карти розрахункового відносного рівня випромінювання будуть використані для визначення місця розташування контрольних точок вимірювання напруженості поля та поверхневої щільності потоку енергії, а також на стадії планування розміщення нового устаткування, що є джерелами випромінювання. Карти фактичного відносного рівня випромінювання, складені за результатами вимірювання, є основою для встановлення зон обмеження забудови і уточнення меж санітарно-захисних зон.

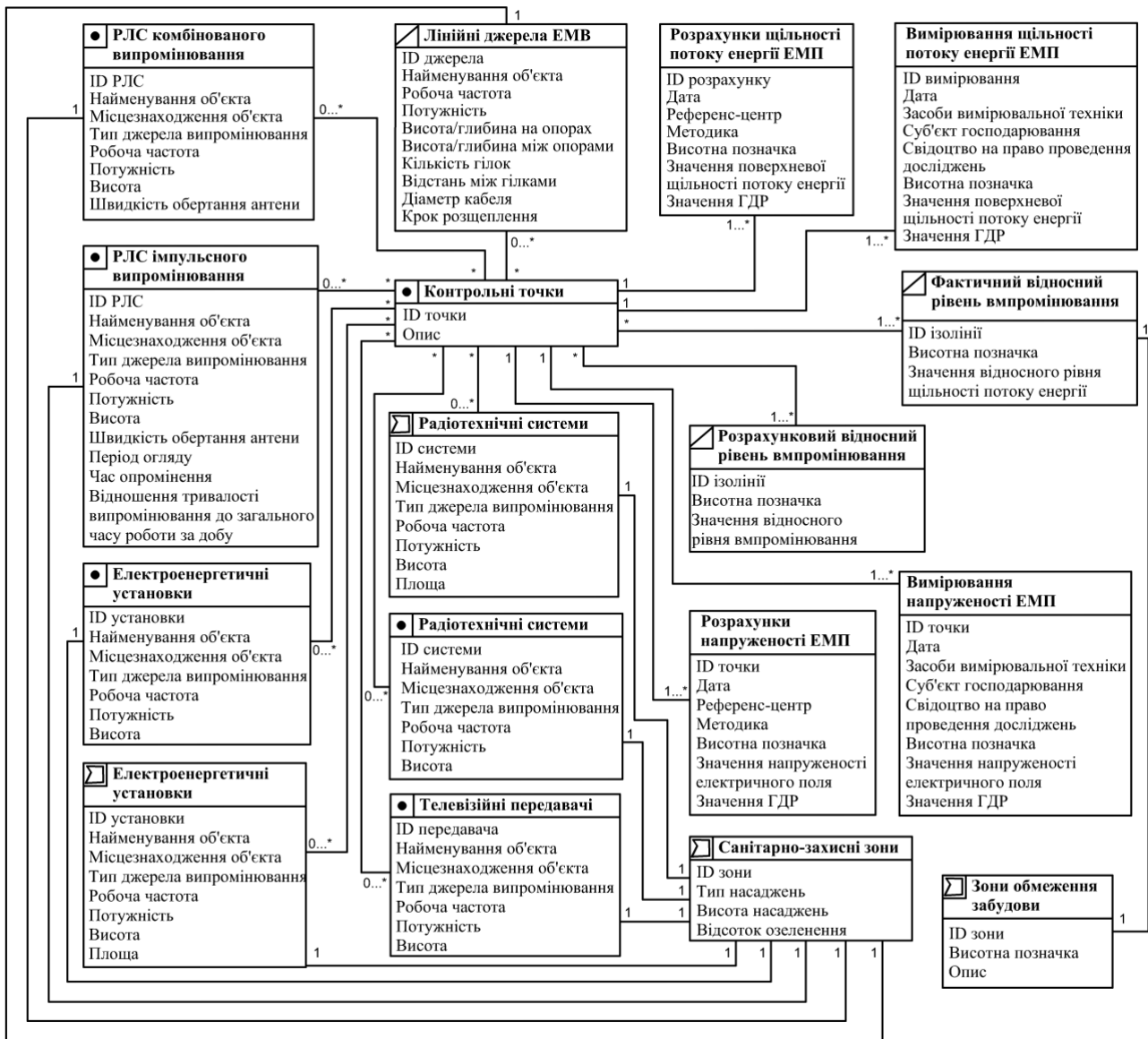


Рис. 2. Діаграма класів профільного набору геопросторових даних системи моніторингу ЕМЗ населених пунктів

Можливі зв'язки між об'єктами базового і профільного наборів даних показані на рис. 3.

Модель бази геопросторових даних моніторингу ЕМЗ території населених пунктів містить 225 атрибутів, з яких 114 атрибутів ввійшли до базового набору геопросторових даних (описують 18 класів об'єктів), а 111 атрибутів – до профільного набору геопросторових даних (описують 17 класів об'єктів). Слід зазначити, що

залежно від рівня розвитку інфраструктури геопросторових даних поселень деякі атрибути профільного набору даних (потужність, висота на опорах та ін.) можуть входити до складу базових наборів. Однак запропонований проєкт моделі може бути легко змінений з урахуванням складу геопросторових баз даних і специфіки населених пунктів, вимог місцевих або регіональних нормативно-правових актів тощо.

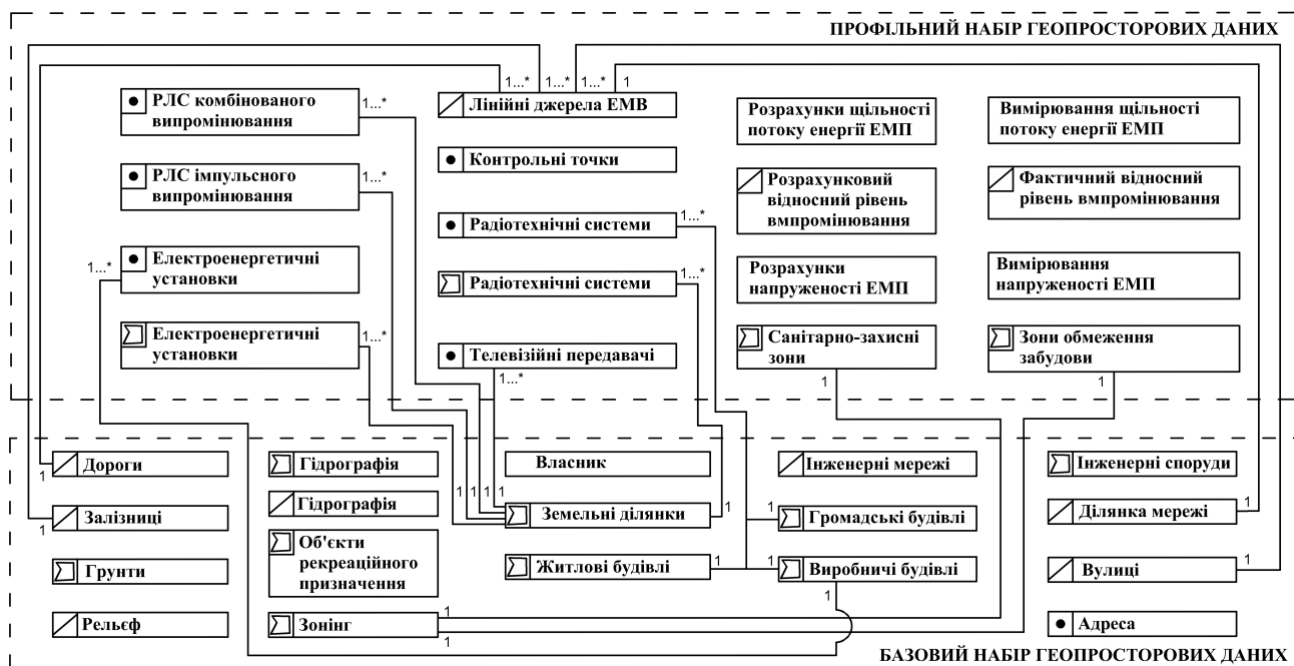


Рис. 3. Зв'язки між класами базового та профільного наборів геопросторових даних системи моніторингу ЕМЗ населених пунктів

Висновки. Проведені раніше вітчизняні та зарубіжні дослідження і досвід інформатизації систем моніторингу довкілля свідчать про доцільність використання ГІС для моніторингу ЕМЗ.

В Україні відсутні нормативно-правові акти, що регламентують процедуру здійснення моніторингу ЕМЗ, але санітарними нормами встановлені ГДР ЕМП для населення. За результатами аналізу предметної сфери розроблено концептуальну модель бази геопросторових даних системи моніторингу ЕМЗ поселень,

що містить 18 класів об'єктів базового набору геопросторових даних і 17 класів профільного набору геопросторових даних. Ця модель може бути доповнена чи змінена з урахуванням місцевих умов або нових вимог законодавства.

Запропонована модель може бути основою фізичного моделювання системи моніторингу ЕМЗ поселень, створення якої підвищить рівень обґрунтованості управлінських рішень при плануванні території поселення і для зменшення негативного впливу ЕМВ на людей і довкілля.

Список використаних джерел

1. Баран Б. А., Бубенщикова Г. Т., Хрящевський В. Н. Біологічна дія електромагнітного випромінювання. *Довкілля та здоров'я*. 2009. № 4. С. 43-46.
2. Hannah Ritchie and Max Roser (2018). Urbanization. *Published online at OurWorldInData.org*. URL: 'https://ourworldindata.org/urbanization'.
3. Macrì M. A., di Luzio and S. di Luzio. Biological Effects of Electromagnetic Fields. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology* (May 2002). P. 95–105. URL: https://doi.org/10.1177/039463200201500204.

4. Sarika Singh, Neeru Kapoor. Health Implications of Electromagnetic Fields, Mechanisms of Action, and Research Needs, *Advances in Biology*. 2014. ol. 2014, Article ID 198609. 24 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/198609>.
5. Torregrossa MV. Effetti biologici e sanitari dei campi elettrici e magnetici a frequenze estremamente basse [Biological and health effects on electric and magnetic fields at extremely low frequencies]. *Ann Ig*. 2005 Sep-Oct;17(5):441-53. Italian. PMID: 16353681.
6. Dong, Xinlin & Niu, Lihua & Wang, Dongjie & He, Yajing. (2015). A Study on the Influence of Electromagnetic Radiation on Nervous System. *MATEC Web of Conferences*. 22. 01004. 10.1051/mateconf/20152201004.
7. Селюк М. М., Потаскалова В. С. Вплив електромагнітних полів надвисокого діапазону на серцево-судинну систему. *Артеріальна гіпертензія*. 2009. № 5(7). URL: <http://www.mif-ua.com/archive/article/10683> (дата звернення 21.07.2022).
8. Mann K., Connemann B. & Röschke J. Cardiac autonomic activity during sleep under the influence of radiofrequency electromagnetic fields. *Somnologie* 9, 180–184 (2005). URL: <https://doi.org/10.1111/j.1439-054X.2005.00068.x>.
9. Olle Johansson. Disturbance of the immune system by electromagnetic fields – A potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment. *Pathophysiology*. Vol. 16, Is. 2–3. 2009. P. 157-177. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.03.004>.
10. Redlarski G., Lewczuk B., Żak A., Koncicki A., Krawczuk M., Piechocki J., Jakubiuk K., Tojza P., Jaworski J., Ambroziak D., Skarbek Ł., Gradolewski D. The Influence of Electromagnetic Pollution on Living Organisms: Historical Trends and Forecasting Changes. *BioMed Research International*. 2015. Vol. 2015, Article ID 234098. 18 p. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/234098> (дата звернення 22.07.2022).
11. Ozguner M., Koyu A., Cesur G. et al. Biological and morphological effects on the reproductive organ of rats after exposure to electromagnetic field. *Saudi Med J*. 2005. 26(3):405-410. PMID: 15806208
12. Belyavskaya N. A. Biological effects due to weak magnetic field on plants. *Adv Space Res*. 2004;34(7):1566-74. doi: 10.1016/j.asr.2004.01.021. PMID: 15880893.
13. Никифоров В. В., Сакун О. А., Бахарев В. С. Оцінка та прогнозування впливу шумового та електромагнітного забруднення на природно-заповідні та рекреаційні території. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2015. № 4 (93). С. 90-96.
14. Tkalec M., Malarić K., Pavlica M., Pevalek-Kozlina B., Vidaković-Cifrek Z. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutat Res*. 2009 Jan 31;672(2):76-81. doi: 10.1016/j.mrgentox.2008.09.022. Epub 2008 Nov 5. PMID: 19028599.
15. Думанський В. Ю. Гігієнічна оцінка електромагнітної ситуації та наукове обґрунтування вимог до її безпеки в сучасних населених місцях України: автореф. дис. ... д-ра мед. наук : 14.02.01. ДУ «Ін-т гігієни та мед. екології ім. О.М. Марзєєва» АМН України. Київ, 2009. 41 с.
16. Безверха А. П. Гігієнічна оцінка електромагнітного випромінювання, що створюється засобами транкінгового зв'язку. *Гігієна населених місць: зб. наук. праць*. Київ, 2017. № 67. С. 111-117.
17. Галак С. С. Гігієнічна оцінка електромагнітного випромінювання, що створюється базовими станціями та мобільними радіотелефонами стандарту DCS-1800. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 171-183.

18. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)1. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics: May 2020. Vol. 118. Is. 5. P. 483-524. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
19. Haneda K. et al. «Chapter 2 – Radio propagation modeling methods and tools» in Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond, London, U.K.:Academic, pp. 7-48, 2021, [online] Available: URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205815000080>.
20. Сотніков О. М., Дем'янчук Б. О. Характеристики поглинання хвиль середовищем з електромагнітними втратами. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 3(52). С. 88-92.
21. Hang Zhou. Modeling the atmospheric propagation of electromagnetic waves in 2D and 3D using fourier and wavelet transforms. Electromagnetism. Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2018. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01929593/document>.
22. Milanović J., Rimac-Drlje S., Majerski I. Radio wave propagation mechanisms and empirical models for fixed wireless access systems. *Tehnički vjesnik*. 2010.17(1). Str. 43-53. URL: <https://hrcak.srce.hr/50605>.
23. Corre Y., Lostanlen Y. Three-Dimensional Urban EM Wave Propagation Model for Radio Network Planning and Optimization Over Large Areas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 58, no. 7. Sept. 2009. P. 3112-3123. doi: 10.1109/TVT.2009.2016973.
24. Тихенко О. М. Методи захисту працюючих від впливу електромагнітних випромінювань ультрависоких та вищих частот. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. Вип. 32. С. 141-150. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop_2016_32_18.
25. Panagopoulos D. J., Chrousos G. P. Shielding methods and products against man-made Electromagnetic Fields: Protection versus risk. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 667. P. 255-262. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.344.
26. Majcher K., Musiał M., Pakos W., Rózański A., Sobótka M., Trapko T. Methods of Protecting Buildings against HPM Radiation – A Review of Materials Absorbing the Energy of Electromagnetic Waves. *Materials (Basel)*. 2020. 13(23). 5509. doi: 10.3390/ma13235509.
27. Maity S., Singha K., Debnath P., Singha M. Textiles in Electromagnetic Radiation Protection. *Journal of Safety Engineering*. 2013. Vol. 2. No. 2. P. 11-19. doi: 10.5923/j.safety.20130202.01.
28. Dürrenberger G., Fröhlich J., Rööslı M., Mattsson M. O. EMF monitoring-concepts, activities, gaps and options. *Int J Environ Res Public Health*. 2014. Sep 11;11(9):9460-79. doi: 10.3390/ijerph110909460.
29. Bieńkowski P., Podlaska J., Zubrzak B. Electromagnetic field in the environment – estimation methods and monitoring. *Medycyna Pracy*. 2019;70(5):567-585. doi:10.13075/mp.5893.00840.
30. Запорожець О. І., Левченко Л. О. Засади електромагнітного моніторингу міста в умовах підвищення електромагнітного навантаження на довкілля. *Екологічна безпека та природокористування*. 2015. № 1(17). С. 29-34. URL: <https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/14/201517.pdf>.
31. Troisi F., Boumis M., Grazioso P. The Italian national electromagnetic field monitoring network. *Annales des Télécommunications*. 2008. 63. P. 97-108. DOI:10.1007/s12243-007-0011-4.
32. Ares-Pena F. J., Franceschetti G., Iodice A., Salas-Sánchez A. A. Simple and effective monitoring of the electromagnetic field in the smart cities arena, *Radio Sci*. 2016. 51. P. 1249–1262. doi:10.1002/2016RS006045.
33. Berna-Martinez J. V., Macia-Perez F., Sánchez-Bernabeu J. M. Monitoring and Prevention the Smart Cities. *Int. J. Adv. Inf. Sci. Technol*. 2014. 31. P. 60-67.

34. Кундельська Т. В., Микицей М. Т. Дослідження електромагнітного забруднення, ускладненого впливом базових станцій стільникового зв'язку, на урбанізованій території міста Івано-Франківська. *Екологічна безпека та природокористування*. 2017. 23 (1-2). С. 20-27. URL: <http://es-journal.in.ua/issue/view/9397>.
35. Шугуров О. О., Новосьолова А. П. Сучасний розподіл електромагнітних хвиль з частотою 2,4 ГГц на території м. Дніпра. *Ecology and Noospherology*. 2017. 28 (1-2). URL: <https://en.dp.ua/index.php/en/article/view/9>.
36. Cannuli A., Calabrò E., Caccamo M. T., Magazù S. A study of monitoring high frequency electromagnetic field pollution in urban areas. *RAD Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1. P. 36-39. DOI:10.21175/RadProc.2016.10.
37. Думанський В. Ю., Біткін С. В. Про санітарно-гігієнічне картографування електромагнітної обстановки населених місць. *Актуальні питання гігієни та екології безпеки України: Зб. тез доповідей наук.-практ. конф. до 120-річчя народження академіка О. М. Марзєєва*. Київ, 2003. Вип. 5. С. 44-45.
38. Paniagua J. M., Rufo M., Jimenez A., Antolin A. The spatial statistics formalism applied to mapping electromagnetic radiation in urban areas. *Environ Monit Assess*. 2013. Jan;185(1). P. 311-22. doi: 10.1007/s10661-012-2555-7.
39. Liu J., Wei M., Li H., Wang X., Wang X., Shi S. Measurement and mapping of the electromagnetic radiation in the urban environment. *Electromagn Biol Med*. 2020. 39(1). PP. 38-43. doi: 10.1080/15368378.2019.1685540.
40. Rinaldi Antonio. A GIS-based system for electromagnetic risk management in urban areas. *J. Location Based Services*. 2009. 3 (1). P. 3-23. doi: 10.1080/17489720902776720.
41. Корнієнко І. В. Обґрунтування умов і сценаріїв геоінформаційного моделювання електромагнітного забруднення. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» : науковий збірник*. Чернігів, 2012. № 4 (61). С. 213-218.
42. Alaboudi J. A., Hamza M. T., Hammadi A. M. and Afaj A. H. Using Geographical Information System for Electromagnetic Fields Environmental Pollution Mapping (Applied Study in Baghdad City). *Elixir Environ. & Forestry* 99 (2016). PP. 43109-43112. URL: https://www.academia.edu/40414765/Using_Geographical_Information_System_for_Electromagnetic_Fields_Environmental_Pollution_Mapping_Applied_Study_in_Baghdad_City_.
43. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 19.06.1996 р. № 173. Дата оновлення: 07.03.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (дата звернення: 11.08.2022).
44. Про затвердження державних санітарних правил та норм (ДСН 239-96): наказ Міністерства охорони здоров'я України від 01.08.1996 р. № 239. Дата оновлення: 22.01.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (дата звернення: 11.08.2022).
45. Про затвердження Методики розрахунку розподілу рівнів електромагнітного поля: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 29.11.2013 р. № 1040. Дата оновлення: 10.01.2014. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (дата звернення: 11.08.2022).
46. Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення: Закон України від 24.02.1994 р. № 4004-XII. Дата оновлення: 14.01.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12#Text> (дата звернення: 11.08.2022).
-

Козарь Валентин Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры гражданской безопасности, охраны труда, геодезии та землеустрою, Кременчужский национальный университет имени Михаила Остроградского. ORCID iD: 0000-0003-4084-3507. E-mail: v.kozar@meta.ua.

Бахарев Володимир Сергійович, доктор технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0001-9312-654X. E-mail: v.s.baharev@gmail.com.

Гальченко Надія Павлівна, кандидат біологічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. ORCID iD: 0000-0003-2659-177X. Тел.: +38 (067) 270-42-90. E-mail: nadingal9@gmail.com.

Дорожко Євген Вікторович, кандидат технічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-2894-2131. E-mail: evgeniy.dorozhko@gmail.com.

Kozar Valentyn Ivanovich, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Civil Safety, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University. ORCID iD: 0000-0003-4084-3507. E-mail: v.kozar@meta.ua.

Bakhariev Volodymyr Serhiiiovych, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor; Department of Civil Safety, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University. ORCID iD: 0000-0001-9312-654X. E-mail: v.s.baharev@gmail.com.

Halchenko Nadiia Pavlivna, PhD (Biol.), Associate Professor; Department of Civil Safety, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University. ORCID iD: 0000-0003-2659-177X. E-mail: nadingal9@gmail.com.

Dorozhko Yevhen Viktorovych, PhD (Tech.), Associate Professor; Department of Road Design, Geodesy and Land Management, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-2894-2131. E-mail: evgeniy.dorozhko@gmail.com.

Статтю прийнято 20.12.2022 р.

УДК 332.2:528.4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ

Аспірант В. В. Головачов

FEATURES OF REGIONAL LAND USE IN MODERN CONDITIONS

postgraduate student V. V. Holovachov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273621>



Анотація. Встановлено, що розроблення та впровадження багатоцільового кадастру на регіональному рівні визначається необхідністю удосконалення інформаційного забезпечення земельних відносин, використання об'єктів нерухомого майна з урахуванням комплексу просторових, містобудівних, екологічних та інвестиційних чинників. У сучасних умовах вирішення питань зростання ефективності використання земель на регіональному рівні здійснюється шляхом застосування сучасних інформаційних технологій, де комплексно враховуються просторові, містобудівні, екологічні та інвестиційні чинники. Впровадження багатоцільового кадастру відповідає практикам розвитку кадастрових систем Європейського Союзу.

Метою дослідження є подання результатів математичного моделювання регіонального розвитку з урахуванням впливу просторових, містобудівних, інвестиційних, екологічних чинників багатоцільового кадастру. Для досягнення поставленої мети виконані такі завдання:

- застосування інструментарію математичного моделювання регіонального розвитку;

- здійснення прогнозування змін показника регіонального розвитку, враховуючи вплив чинників багатоцільового кадастру.

Здійснено математичне моделювання регіонального розвитку на основі результатів кореляційно-регресійного аналізу змін інтегрального показника оцінювання інформаційного забезпечення багатоцільового кадастру і валового регіонального продукту, що дозволяє встановити прогнозні зміни та побудувати геопросторове забезпечення регіонального розвитку.

На основі математичного моделювання проведено прогнозування змін регіонального розвитку, що дозволило сформулювати кількісну основу для прийняття обґрунтованих рішень, враховуючи вплив чинників багатоцільового кадастру.

Ключові слова: багатоцільовий кадастр, просторові, містобудівні, інвестиційні, екологічні чинники, регіональний розвиток.

Abstract. It was established that the development and implementation of the multi-purpose cadastre at the regional level is determined by the need to improve the information support of land relations, the use of real estate objects, considering the complex of spatial, urban planning, environmental and investment factors. In modern conditions, solving the issues of increasing the efficiency of land use at the regional level is carried out using modern information technologies, which comprehensively consider spatial, urban planning, environmental and investment factors. The implementation of the multi-purpose cadastre corresponds to the practices of development of the cadastral systems of the European Union.

The purpose of the study is to present the results of mathematical modelling of regional development, considering the influence of spatial, urban planning, investment, environmental factors of the multi-purpose cadastre. To achieve the set goal, the following tasks were completed:

application of the tools of mathematical modelling of regional development;

carrying out forecasting of changes in the regional development indicator, considering the influence of the factors of the multi-purpose cadastre.

Mathematical modelling of regional development was carried out based on the results of the correlation-regression analysis of changes in the integral indicator of the assessment of the information support of the multi-purpose cadastre and the gross regional product, which allows to establish forecast changes and build geospatial support for regional development.

Based on mathematical modelling, forecasting of changes in regional development was carried out, which made it possible to form a quantitative basis for making informed decisions, considering the influence of factors of the multi-purpose cadastre.

Keywords: Multipurpose cadastre, spatial, urban planning, investment, environmental factors, regional development.

Вступ. Розроблення та впровадження багатоцільового кадастру на регіональному рівні визначається необхідністю удосконалення інформаційного забезпечення земельних відносин, використання об'єктів нерухомого майна з урахуванням комплексу просторових, містобудівних, екологічних та інвестиційних чинників. Для розвитку інформаційного забезпечення

багатоцільового кадастру на регіональному рівні актуальними питаннями є застосування сучасних геоінформаційних систем при визначенні можливостей переходу від 2D кадастру до кадастрів «нового» покоління 3D та 4D.

У сучасних умовах вирішення питань зростання ефективності використання земель на регіональному рівні здійснюється

шляхом застосування сучасних інформаційних технологій, де комплексно враховуються просторові, містобудівні, екологічні та інвестиційні чинники. Впровадження багатоцільового кадастру відповідає практикам розвитку кадастрових систем Європейського Союзу. У цьому аспекті особливого значення має формування інформаційного забезпечення на основі застосування інструментів математичного моделювання.

Отже, тема дослідження є актуальною, а її розроблення має своєчасний характер.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенням проблем формування та використання багатоцільового кадастру займається багато вчених. Зокрема Нестеренко С. Г. та Касьянов В. В. пропонують вирішення проблеми інформаційного забезпечення тривимірного кадастру за допомогою аналізу існуючих методик збору вихідної інформації при побудові тривимірних моделей об'єктів нерухомості в аспекті багатоцільового кадастру [1]. Горковчуком М. В. запропоновано реалізацію моделі реляційної бази даних електронного каталогу мір якості у вигляді окремого сервісу, що дасть змогу використовувати такий каталог у середовищах різноманітних інструментальних ГІС для формування технічних вимог, специфікацій, метаданих і звітів про оцінювання якості [2]. Карпінський Ю. визначив, що нормативна документація в топографо-геодезичній і картографічній галузі ідеологічно та технологічно виявляється застарілою. А рівень розвитку і застосування сучасних технологій збирання геопросторових даних значно випереджає нормативну базу щодо них в Україні [3]. Мамоновим К. А. запропоновано методологічний підхід інтегрального оцінювання територіального розвитку використання земель регіону [4, 5]. Музика Н. М. визначила, що, впровадивши тривимірну реєстрацію земельних ділянок та об'єктів нерухомості, можна отримати

значну підвищену вартість нерухомості, що також дає можливість органам державної влади і органам місцевого самоврядування вирішувати питання з управління розвитку території [6]. Шипулін В. Д. зауважив, що наріжним каменем сучасної теорії земельного адміністрування є парадигма земельного менеджменту, у якій чотири функції – володіння, оцінювання, використання і розвиток землі – цілісно розглядаються як важливі функції, виконувани організованими спільнотами [7].

А вчені Янтъен Стотер, Хендрік Плогер та Рубен Роес Roes у своїй роботі подали перший 3D кадастровий облік багаторівневих речових у Нідерландах. Вони вважають, що оптимальне 3D-кадастрове рішення – це компроміс між юридичними, кадастровими та технічними аспектами, але вони не можуть передбачити, як ці аспекти найкраще поєднуються [8].

Разом із тим залишаються невирішеними питання щодо розроблення й впровадження багатоцільового кадастру на регіональному рівні, урахуваючи вплив просторових, містобудівних, інвестиційних і екологічних чинників.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є подання результатів математичного моделювання регіонального розвитку, урахуваючи вплив просторових, містобудівних, інвестиційних, екологічних чинників багатоцільового кадастру. Для досягнення поставленої мети виконано такі завдання:

- застосування інструментарію математичного моделювання регіонального розвитку;
- здійснення прогнозування змін показника регіонального розвитку, урахуваючи вплив чинників багатоцільового кадастру.

Основна частина дослідження. Узагальнюючим критерієм розвитку регіонів є валовий регіональний продукт. У дослідженні на основі застосування математичного моделювання визначається вплив

інтегрального показника розроблення та впровадження багатопільового кадастру на індекс валового регіонального продукту.

На основі аналізу динаміки індексу валового регіонального продукту за 2004 – 2020 рр. виявлено хвилеподібні тенденції (рис. 1). Зокрема, з 2004 р. по 2008 р., 2010 – 2012 рр., 2016 – 2019 рр. спостерігалось зростання узагальнюючого

показника регіонального розвитку, у 2009 р., 2014 – 2015 рр., 2020 р. – падіння. Визначено, що зниження індексу валового регіонального продукту пов'язано з загальними тенденціями накопичення кризових явищ в Україні.

Динаміка індексу валового регіонального продукту за регіонами України наведена в табл. 1.

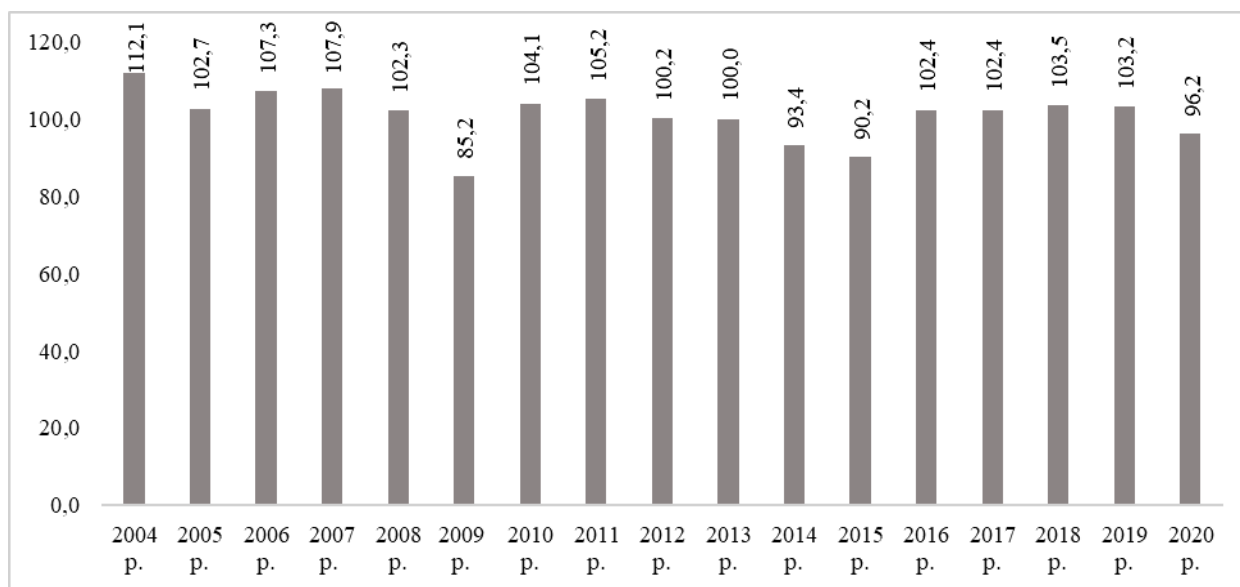


Рис. 1. Динаміка індексу валового регіонального продукту, відсоток до попереднього року (розроблено автором) [9]

Таблиця 1

Динаміка індексу валового регіонального продукту за регіонами України, % до попереднього року [9]

Регіон	2004 р.	2005 р.	2006 р.	2007 р.	2008 р.	2009 р.	2010 р.	2011 р.	2012 р.	2013 р.	2014 р.	2015 р.	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.	2020 р.
Вінницький	111,9	105,3	106,2	103,4	105,1	90,1	103,0	107,2	103,7	104,8	104,6	97,1	106,5	101,6	105,0	108,6	94,7
Волинський	119,0	103,7	103,5	112,1	106,1	86,0	100,2	105,3	104,8	99,3	101,1	95,3	108,2	105,2	103,8	94,2	97,2
Дніпропетровський	111,0	107,3	108,0	105,3	97,3	83,5	105,8	103,4	97,5	99,3	95,1	90,3	98,4	102,0	102,5	103,7	93,0

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Одеський	Миколаївський	Львівський	Луганський	Кіровоградський	Київський	Івано-Франківський	Запорізький	Закарпатський	Житомирський	Донецький							
108,1	118,1	105,2	108,2	118,9	109,8	107,6	115,6	106,4	115,6	110,8							
99,6	100,1	98,1	100,3	102,4	107,3	105,9	104,6	98,5	101,1	97,1							
103,5	107,1	108,3	104,3	105,1	108,8	102,5	106,1	106,6	103,6	108,3							
106,3	99,5	105,8	105,2	97,9	105,9	100,8	108,5	108,2	105,1	104,6							
111,9	106,9	100,7	98,9	113,7	104,4	97,5	101,3	103,9	104,2	97,1							
86,8	92,5	88,3	86,7	85,8	89,2	89,3	78,9	82,1	88,9	81,6							
102,4	103,2	102,3	102,3	105,7	105,1	100,5	103,2	107,7	112,8	111,1							
102,1	102,7	108,7	109,1	109,2	111,7	106,5	102,9	104,7	102,7	111,4							
96,8	96,1	102,0	99,1	100,7	101,9	103,3	97,8	103,0	109,4	97,1							
105,7	104,4	98,8	92,2	109,5	93,4	97,7	99,3	100,6	101,9	94,7							
98,3	98,4	100,9	61,0	100,6	99,4	97,6	100,4	102,8	103,6	67,1							
95,8	95,3	95,2	47,7	91,7	94,0	92,0	94,7	93,5	98,1	61,3							
104,2	105,6	99,3	118,0	105,0	105,7	99,0	99,7	97,3	105,2	99,1							
104,0	99,0	103,7	83,6	98,4	104,4	107,1	102,9	103,2	104,9	94,9							
101,8	103,1	105,7	98,7	107,0	106,9	105,7	100,6	104,0	104,8	100,5							
103,4	106,6	104,6	104,3	106,2	104,1	106,1	102,6	101,5	100,5	101,7							
96,6	91,2	99,7	98,2	90,8	97,4	97,0	95,7	93,8	96,3	96,9							

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Чернігівський	110,0	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3	109,3
Чернівецький	100,1	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5
Черкаський	103,4	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5	105,5
Хмельницький	106,5	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3	108,3
Херсонський	102,3	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4	105,4
Харківський	89,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6	88,6
Тернопільський	100,0	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3	100,3
Сумський	107,8	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0	104,0
Рівненський	104,0	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1	106,1
Полтавський	95,8	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5

Для виявлення загальних тенденцій проведено аналіз динаміки зміни індексу валового регіонального продукту за

регіонами України на підставі рівняння лінійної регресії та середніх значень за період 2004 – 2020 рр. (табл. 2).

Таблиця 2

Результати аналізу динаміки зміни індексу валового регіонального продукту за регіонами України на підставі рівняння лінійної регресії та середніх значень за період 2004 – 2020 рр., % до минулого року (розроблено автором)

Регіон	Рівняння лінійної регресії	Середнє арифметичне	Середнє геометричне
Вінницький	$y = -0,2532x + 105,74$	103,46	103,33
Волинський	$y = -0,5919x + 107,97$	102,65	102,39
Дніпропетровський	$y = -0,5377x + 105,04$	100,20	99,96
Донецький	$y = -0,8135x + 103,52$	96,19	95,04
Житомирський	$y = -0,3431x + 106,54$	103,45	103,28
Закарпатський	$y = -0,31x + 103,84$	101,05	100,83
Запорізький	$y = -0,4961x + 105,34$	100,87	100,59
Івано-Франківський	$y = -0,0814x + 101,68$	100,95	100,81
Київський	$y = -0,3691x + 106,23$	102,91	102,72
Кіровоградський	$y = -0,5179x + 107,52$	102,86	102,53
Луганський	$y = -0,8179x + 102,53$	95,16	93,20
Львівський	$y = -0,0544x + 102,1$	101,61	101,48
Миколаївський	$y = -0,4924x + 106,18$	101,75	101,56
Одеський	$y = -0,2341x + 103,71$	101,61	101,45
Полтавський	$y = -0,5547x + 105,01$	100,02	99,78
Рівненський	$y = -0,2821x + 104,34$	101,80	101,63
Сумський	$y = -0,2223x + 103,16$	101,16	101,06
Тернопільський	$y = -0,376x + 106,55$	103,16	103,02
Харківський	$y = -0,5115x + 105,54$	100,94	100,76
Херсонський	$y = -0,3135x + 104,38$	101,56	101,47
Хмельницький	$y = -0,2679x + 104,6$	102,19	102,04
Черкаський	$y = -0,6593x + 108,94$	103,01	102,74
Чернівецький	$y = -0,3159x + 104,68$	101,84	101,70
Чернігівський	$y = -0,2846x + 103,68$	101,12	100,99

На підставі даних, отриманих за лінійною регресією індексу валового регіонального продукту, зроблено висновки, що у всіх регіонах спостерігається падіння ВРП, проте темпи падіння суттєво відрізняються. Найгірша ситуація спостерігається в Донецькому та Луганському регіонах – по 0,81 та 0,82 % щорічно відповідно. Найкраща ситуація – у

Львівській (0,05 %) та Івано-Франківській (0,08 %) областях.

Щорічне падіння індексу ВРП у Донецькому та Луганському регіонах підтверджується середніми значеннями ВРП за період 2004–2020 рр. на рівні 95–96 %. У всіх інших регіонах середні значення індексу ВРП перевищують 100 %, отже тенденція до падіння обумовлена

хвилеподібними тенденціями зміни індексу валового регіонального продукту.

Виявити особливості динаміки зміни індексу ВРП можна на підставі

дослідження абсолютних відхилень показника від його середніх значень. Абсолютне відхилення індексу ВРП розраховується за формулою

$$\Delta_{I_{\text{ВРП}_j}} = I_{\text{ВРП}_j} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_{\text{ВРП}_k}, \quad (k = \overline{1;n}) \quad (1)$$

Динаміка зміни відхилення від середнього значення індексу валового регіонального продукту за регіонами наведена в табл. 3.

У результаті розрахунку встановлено, що найкращими періодами є 2004 р. – значення індексу ВРП перевищує середні значення майже на 10 і вище відсотків в усіх регіонах України; у 2006 та 2011 рр. (крім Житомирського регіону) в усіх регіонах значення індексу ВРП перевищувало середні значення.

Криза 2014–2015 рр. обумовила падіння індексу ВРП не лише в Донецькому (на 30 та 35 % відповідно) і Луганському (на 34 та 47 % відповідно), а й в усіх без виключення регіонах України. За 2017–2018 рр. ситуація стабілізувалась, у більшості регіонів значення індексу ВРП перевищували середні значення. У 2020 р. на тлі пандемії коронавірусу падіння індексу валового регіонального продукту спостерігалось в усіх регіонах України.

З метою визначення впливу інтегрального показника розроблення та впровадження багатопільового кадастру на валовий регіональний продукт проведено кореляційно-регресійний аналіз, результати якого подано в табл. 4.

У результаті математичного моделювання встановлено, що зв'язок між інтегральним показником рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру й валовим регіональним продуктом майже відсутній. Виключенням є періоди, що можна назвати кризовими для економіки України (2014–2016 рр., 2020 р.).

Це дає змогу зробити висновки, що рівень інформаційного забезпечення багатопільового кадастру є незадовільним і неоднорідним за регіонами. Якщо порівняти результати кореляційно-регресійного аналізу впливу інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру на регіональному рівні на валовий регіональний продукт, внесок у дисперсію яких виявився мінімальним, а саме у Вінницькому, Тернопільському, Харківському, Хмельницькому та Чернівецькому, ситуація виявляється набагато кращою (табл. 5). Саме тому при побудові імітаційної моделі необхідно виокремлювати регіони, які за множиною ознак вважати базовими, і на підставі аналізу їхніх характеристик обирати важелі, за допомогою яких можна корегувати степінь впливу інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру.

Для виявлення, які саме складові інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру на регіональному рівні значною мірою впливають на показники валового регіонального продукту, проведено числовий експеримент, результати якого подано в табл. 6. Експеримент здійснено шляхом порівнянням впливу зміни групових складових інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру на регіональному рівні на валовий регіональний продукт за 2018 р.

Таблиця 3

Динаміка зміни відхилення від середнього значення індексу валового регіонального продукту за регіонами, відн. од. (розраховано автором)

Регіон	2004 p.	2005 p.	2006 p.	2007 p.	2008 p.	2009 p.	2010 p.	2011 p.	2012 p.	2013 p.	2014 p.	2015 p.	2016 p.	2017 p.	2018 p.	2019 p.	2020 p.	Середнє відхилення
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Вінницький	8,44	1,84	2,74	-0,96	1,64	1,64	-0,46	3,74	0,24	1,34	1,14	-6,36	3,04	-1,86	1,54	5,14	-8,76	0,88
Волинський	16,35	1,05	0,85	9,45	3,45	3,45	-2,45	2,65	2,15	-3,35	-1,55	-7,35	5,55	2,55	1,15	-8,45	-5,45	1,18
Дніпропетровський	10,80	7,10	7,80	5,10	-2,90	-2,90	5,60	3,20	-2,70	-0,90	-5,10	-9,90	-1,80	1,80	2,30	3,50	-7,20	0,81
Донецький	14,61	0,91	12,11	8,41	0,91	0,91	14,91	15,21	0,91	-1,49	-29,09	-34,89	2,91	-1,29	4,31	5,51	0,71	0,91
Житомирський	12,15	-2,35	0,15	1,65	0,75	0,75	9,35	-0,75	5,95	-1,55	0,15	-5,35	1,75	1,45	1,35	-2,95	-7,15	0,90
Закарпатський	5,35	-2,55	5,55	7,15	2,85	2,85	6,65	3,65	1,95	-0,45	1,75	-7,55	-3,75	2,15	2,95	0,45	-7,25	1,28
Запорізький	14,73	3,73	5,23	7,63	0,43	0,43	2,33	2,03	-3,07	-1,57	-0,47	-6,17	-1,17	2,03	-0,27	1,73	-5,17	1,32
Івано-Франківський	6,65	4,95	1,55	-0,15	-3,45	-3,45	-0,45	5,55	2,35	-3,25	-3,35	-8,95	-1,95	9,15	4,75	5,15	-3,95	0,48
Київський	6,89	4,39	5,89	2,99	1,49	1,49	2,19	8,79	-1,01	-9,51	-3,51	-8,91	2,79	1,49	3,99	1,19	-5,51	0,89
Кіровоградський	16,04	-0,46	2,24	-4,96	10,84	10,84	2,84	6,34	-2,16	6,64	-2,26	-11,16	2,14	-4,46	4,14	3,34	-12,06	1,64
Луганський	13,04	5,14	9,14	10,04	3,74	3,74	7,14	13,64	3,94	-2,96	-34,16	-47,46	22,84	-11,56	3,54	9,14	3,04	0,72

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Львівський	3,59	-3,51	6,69	4,19	-0,91	-0,91	0,69	7,09	0,39	-2,81	-0,71	-6,41	-2,31	2,09	4,09	2,99	-1,91	0,73
Миколаївський	16,35	-1,65	5,35	-2,25	5,15	5,15	1,45	0,95	-5,65	2,65	-3,35	-6,45	3,85	-2,75	1,35	4,85	-10,55	0,85
Одеський	6,49	-2,01	1,89	4,69	10,29	10,29	0,79	0,49	-4,81	4,09	-3,31	-5,81	2,59	2,39	0,19	1,79	-5,01	1,48
Полтавський	16,68	-0,82	8,18	5,78	-5,12	-5,12	9,48	1,78	-2,22	-5,62	-4,02	-6,22	-2,12	-3,32	3,78	0,98	-4,02	0,48
Рівненський	11,30	0,30	5,10	2,70	-2,30	-2,30	5,00	2,80	1,50	-4,90	0,80	-8,40	-1,50	1,60	-0,30	5,30	-3,70	0,76
Сумський	4,74	3,24	2,24	2,24	2,44	2,44	-2,26	6,64	0,54	1,54	-0,76	-4,46	-4,56	-1,06	4,34	0,74	-3,16	0,88
Тернопільський	3,24	-0,66	7,14	5,14	1,94	1,94	-2,76	8,14	5,84	-6,56	4,84	-9,46	-4,66	2,34	0,14	0,44	-6,36	0,62
Харківський	11,26	3,86	6,56	6,26	1,16	1,16	0,76	3,56	-2,54	-2,14	-3,04	-10,04	1,16	0,26	1,46	0,46	-4,34	0,93
Херсонський	9,64	-2,36	2,44	-1,16	8,24	8,24	0,24	2,24	-1,36	-0,46	-1,86	-2,86	1,24	-0,86	-1,66	3,04	-5,96	0,99
Хмельницький	10,51	1,71	2,01	1,81	-2,29	-2,29	-2,19	5,81	6,81	-5,29	0,11	-9,99	2,51	4,01	-0,29	-1,49	-2,19	0,55
Черкаський	13,89	3,99	2,59	3,49	11,89	11,89	2,89	3,39	-2,11	-2,31	-4,11	-8,01	-1,21	-4,81	5,79	0,69	-8,61	1,73
Чернівецький	7,46	-0,34	3,66	6,46	3,56	3,56	-1,54	2,16	4,26	-0,34	-3,54	-7,14	-2,44	1,56	2,76	3,26	-6,54	0,99
Чернігівський	8,88	-1,02	2,28	5,38	1,18	1,18	-1,12	6,68	2,88	-5,32	-0,62	-7,72	-0,52	0,88	3,08	0,58	-4,02	0,75

Таблиця 4

Результати кореляційно-регресійного аналізу впливу інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру на регіональному рівні на валовий регіональний продукт за регіонами України, відн. од. (розроблено автором)

Рік	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>R</i>	-0,186	-0,136	0,159	0,167	0,099	0,059	0,177	-0,102	0,113
Рік	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
<i>R</i>	0,088	0,371	0,454	-0,685	0,390	0,397	0,017	0,086	

Таблиця 5

Кореляційний аналіз впливу інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру на регіональному рівні на валовий регіональний продукт за «базовими» регіонами України, відн. од. (розроблено автором)

Рік	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>R</i>	-0,865	-0,409	0,300	0,187	0,402	0,780	-0,531	0,615	0,916
Рік	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
<i>R</i>	-0,185	0,662	0,334	0,488	0,791	0,235	0,322	-0,020	

Таблиця 6

Результати проведення числового експерименту з корегування інтегрального показника рівня інформаційного забезпечення багатопільового кадастру на регіональному рівні за рахунок зміни його групових складових, відн. од. (розроблено автором)

Просторовий показник	Містобудівний показник	Екологічний показник	Інвестиційний показник	<i>R</i>
1	2	3	4	5
0	0	0	0	0,371
0	0	0	+0,2	0,397
0	0	+0,2	0	0,405
0	0	+0,2	+0,2	0,406
0	+0,2	0	0	0,389
0	+0,2	0	+0,2	0,389
0	+0,2	+0,2	0	0,397
0	+0,2	+0,2	+0,2	0,398
+0,2	0	0	0	0,397
+0,2	0	0	+0,2	0,397
+0,2	0	+0,2	0	0,405
+0,2	0	+0,2	+0,2	0,406
+0,2	+0,2	0	0	0,388
+0,2	+0,2	0	+0,2	0,417
+0,2	+0,2	+0,2	0	0,415
+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	0,419
0	0	0	+0,4	0,397
0	0	+0,4	0	0,413
0	0	+0,4	+0,4	0,415

Продовження табл. 6

1	2	3	4	5
0	+0,4	0	0	0,380
0	+0,4	0	+0,4	0,420
0	+0,4	+0,4	0	0,418
0	+0,4	+0,4	+0,4	0,418
+0,4	0	0	0	0,397
+0,4	0	0	+0,4	0,398
+0,4	0	+0,4	0	0,418
+0,4	0	+0,4	+0,4	0,418
+0,4	+0,4	0	0	0,417
+0,4	+0,4	0	+0,4	0,419
+0,4	+0,4	+0,4	0	0,420
+0,4	+0,4	+0,4	+0,4	0,410
0	0	0	+0,6	0,398
0	0	+0,6	0	0,421
0	0	+0,6	+0,6	0,424
0	+0,6	0	0	0,373
0	+0,6	0	+0,6	0,417
0	+0,6	+0,6	0	0,420
0	+0,6	+0,6	+0,6	0,401
+0,6	0	0	0	0,414
+0,6	0	0	+0,6	0,417
+0,6	0	+0,6	0	0,420
+0,6	0	+0,6	+0,6	0,402
+0,6	+0,6	0	0	0,420
+0,6	+0,6	0	+0,6	0,403
+0,6	+0,6	+0,6	0	0,413
+0,6	+0,6	+0,6	+0,6	0,377
0	0	0	+0,8	0,398
0	0	+0,8	0	0,418
0	0	+0,8	+0,8	0,405
0	+0,8	0	0	0,418
0	+0,8	0	+0,8	0,406
0	+0,8	+0,8	0	0,417
0	+0,8	+0,8	+0,8	0,373
+0,8	0	0	0	0,417
+0,8	0	0	+0,8	0,407
+0,8	0	+0,8	0	0,417
+0,8	0	+0,8	+0,8	0,374
+0,8	+0,8	0	0	0,418
+0,8	+0,8	0	+0,8	0,376
+0,8	+0,8	+0,8	0	0,396
+0,8	+0,8	+0,8	+0,8	0,337
0	0	0	+1,0	0,418
0	0	+1,0	0	0,420
0	0	+1,0	+1,0	0,387

Продовження табл. 6

1	2	3	4	5
0	+1,0	0	0	0,419
0	+1,0	0	+1,0	0,390
0	+1,0	+1,0	0	0,409
0	+1,0	+1,0	+1,0	0,343
+1,0	0	0	0	0,419
+1,0	0	0	+1,0	0,391
+1,0	0	+1,0	0	0,410
+1,0	0	+1,0	+1,0	0,344
+1,0	+1,0	0	0	0,411
+1,0	+1,0	0	+1,0	0,347
+1,0	+1,0	+1,0	0	0,374
+1,0	+1,0	+1,0	+1,0	0,299

Результати проведеного математичного моделювання дають підставу стверджувати, що більшою мірою на щільність зв'язку впливає величина інвестиційної складової інтегрального показника, а далі, за спаданням, – містобудівна, екологічна та просторова. Збільшення складових інтегрального показника не обов'язково обумовлює збільшення кореляційно-регресійного зв'язку.

Висновки. Здійснено математичне моделювання регіонального розвитку на основі результатів кореляційно-

регресійного аналізу змін інтегрального показника оцінювання інформаційного забезпечення багатоцільового кадастру і валового регіонального продукту, що дозволяє встановити прогностичні зміни та побудувати геопросторове забезпечення регіонального розвитку.

На основі математичного моделювання проведено прогнозування змін регіонального розвитку, що дозволило сформулювати кількісну основу для прийняття обґрунтованих рішень, враховуючи вплив чинників багатоцільового кадастру.

Список використаних джерел

1. Головачов В. В., Шипулін В. Д., Нестеренко С. Г., Касьянов В. В. Забезпечення збору інформації для тривимірного кадастру. *Комунальне господарство міст*. 2019. Т. 5. Вип. 151. С. 6–64.
2. Горковчук М. В. Структура та функції електронного каталогу мір якості геопросторових даних. *Геоінформатика і картографія. Інженерна геодезія*. 2014. Вип. 61. С. 105–110. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/2092> (дата звернення: 27.10.2022).
3. Карпінський Ю. Методи збирання геопросторових даних для топографічного картографування. *Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «GEOTERRACE-2018», Львів, Україна*. URL: https://www.researchgate.net/publication/349536793_METODI_ZBIRANNA_GEOPROSTOROVIH_DANIH_DLA_TOPOGRAFICNOGO_KARTOGRAFUVANNA (дата звернення: 28.10.2022).
4. Мамонов К. А. Територіальний розвиток використання земель регіону: визначення, оцінка та напрями трансформацій: монографія. Харків : ФОП Панов А. М., 2019. 332 с.

5. Мамонов К. А. Територіальний розвиток використання земель регіону: напрями та особливості оцінки: монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 403 с.

6. Музика Н. М. 3D-кадастр, як сучасна складова ДЗК. *Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «GEOTERRACE-2018», Львів, Україна.* URL: <https://openreviewhub.org/sites/default/files/geoterrace/2018/geoterrace-2018/1337/3d-kadastryaksuchasnaskladovadzka.pdf> (дата звернення: 29.10.2022).

7. Шипулін В. Д. Система земельного адміністрування: основи сучасної теорії: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015.

8. Jantien Stoter, Hendrik Ploeger, Ruben Roes. Registration of Multi-Level Property Rights in 3D in The Netherlands: Two Cases and Next Steps in Further Implementation. URL: http://www.gdmc.nl/3dcadastres/literature/3Dcad_2017_03.pdf (last access: 27.10.2022).

9. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 30.10.2022).

Головачов Віталій Вікторович, аспірант кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-4479-8010. E-mail: Vitalii.Holovachov@kname.edu.ua.

Vitalii Holovachov, postgraduate student, department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0003-4479-8010. E-mail: Vitalii.Holovachov@kname.edu.ua.

Статтю прийнято 22.12.2022 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

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

RESEARCH OF THE CONTROL SYSTEM OF THE SOFT START DEVICE OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR

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

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273622>



***Анотація.** Розглянуто систему керування симісторного пристрою плавного пуску асинхронного двигуна з постійним моментом навантаження. Розглянуте керування забезпечує зниження величини пускового струму та пускового моменту асинхронного двигуна. Описано принцип дії та основні технічні параметри пристрою плавного пуску. Розглянуто метод зниження втрат потужності в силових напівпровідникових елементах пристрою плавного пуску. Проведено дослідження електромеханічних процесів пристрою плавного пуску при роботі з асинхронним двигуном за рахунок імітаційного комп'ютерного моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink. Наведено результати імітаційного моделювання: осцилограми вхідних струмів пристрою плавного пуску, динаміку зміни швидкості та пускового моменту асинхронного двигуна. При імітаційному моделюванні встановлено, що робота пристрою плавного пуску дає змогу знизити величину пускового струму та пускового моменту практично вдвічі. Показано, що регулювання часу виходу на повний кут відкриття силових ключів пристрою плавного пуску і стартовий кут відкриття силових ключів, що визначає динаміку розгону асинхронного двигуна, значною мірою впливає на величину максимального амплітудного значення струму та моменту. Результати теоретичних досліджень реалізовано в реальному фізичному прототипі пристрою плавного пуску. Наведено зображення плат розробленого пристрою плавного пуску і вказано його технічні характеристики.*

***Ключові слова:** пристрій плавного пуску, асинхронний двигун, симістор, система керування, пусковий момент.*

***Abstract.** The soft start device is designed to control the process of starting, operation and stopping of electric motors and enables smooth acceleration, smooth stopping, reduction of the starting current of the motor and coordination of the motor torque with the load moment. The article the control system of the triac device of the smooth start of an asynchronous motor with a constant load moment is considered. The control provides a reduction in the starting current and starting torque of the asynchronous motor. The principle of operation and the main technical parameters of the soft start device are described. The method of reducing power losses in power semiconductor elements of the soft start device is considered. The study of electromechanical processes in the soft start device when working with an asynchronous motor was carried out due to*

simulated computer modeling in the Matlab / Simulink software environment. The results of simulation modeling are given: oscillograms of input currents of the soft start device, dynamics of speed change and starting torque of an asynchronous motor. In the course of the simulation, it was established that the operation of the soft start device allows to reduce the starting current and starting torque by almost half. It is shown that the adjustment of the time to reach the full opening angle of the power switches of the soft start device and the starting angle of the opening of the power switches, which determines the acceleration dynamics of the asynchronous motor, significantly affects the value of the maximum amplitude value of the current and torque. The results of theoretical studies were implemented in a real physical prototype of the soft start device. The image of the boards of the developed soft start device is shown and its technical characteristics are indicated.

Keywords: *soft start device, asynchronous motor, triac, control system, starting torque.*

Вступ. Асинхронний електропривід є одним із найбільш розповсюджених, що зумовлено його перевагами: підвищене значення ККД, простота і низька собівартість конструкції асинхронного двигуна, його низькі масогабаритні показники (порівняно з двигуном постійного струму), відсутність колекторно-щіткового механізму, що спрощує його обслуговування [1, 2].

Проте асинхронний електропривід має свої недоліки. Так, у режимі прямого пуску асинхронний двигун має досить великі показники пускового струму та пускового моменту, що негативно впливає на мережу живлення і надійність механічної частини навантаження асинхронного двигуна. Падіння напруги може створювати проблеми для інших навантажень мережі, а якщо падіння напруги занадто велике, то може не запуститися і сам двигун [3, 4].

Для зниження величини пускового моменту і пускового струму застосовують додаткові напівпровідникові перетворювачі, такі як перетворювачі частоти або пристрої плавного пуску [5, 6].

Перетворювачі частоти дають змогу забезпечити зниження величини пускового струму та реалізувати частотно-векторне керування швидкістю і моментом двигуна [7, 8]. Проте мають досить високу собівартість.

У випадках, коли в асинхронному електроприводі нема необхідності

частотного регулювання швидкості, наприклад електропривід систем вентиляції, насосів, то застосування перетворювачів частоти економічно не виправдано, і доцільніше використовувати тиристорні регулятори змінної напруги, що в промисловості називаються пристроями плавного пуску [9, 10].

Пристрої плавного пуску порівняно з перетворювачами частоти мають гірші показники регулювання швидкості та моменту асинхронного двигуна, проте характеризуються значно меншою вартістю, простішою системою керування та є оптимальним рішенням для керування асинхронних двигунів мотор-компресорів, мотор-вентиляторів та інших приводів, що не потребують глибокого регулювання швидкості та моменту [11, 12].

Пристрій плавного пуску призначено для керування процесом запуску, роботи і зупинки електродвигунів та дає змогу виконати плавний розгін, плавну зупинку, зменшення пускового струму двигуна та узгодження обертального моменту двигуна з моментом навантаження. Застосування пристроїв плавного пуску забезпечує обмеження швидкості наростання і максимального значення пускового струму протягом заданого часу (після застосування пристрою плавного пуску значення пускового струму суттєво зменшується) [13, 14].

В електронних пристроях плавного пуску обмеження струму досягається за рахунок плавного наростання напруги на

обмотках електродвигуна. Це дає змогу під час пуску утримувати параметри електродвигуна (струм, напругу і т. п.) у безпечних межах, що знижує ймовірність перегріву обмоток і усуває ривки в механічній частині привода, а також ймовірність виникнення гідравлічних ударів у трубах і засувках у момент пуску і зупинки. У кінцевому підсумку правильно вибраний і налаштований пристрій плавного пуску підвищує показники довговічності і безвідмовності електродвигуна і його привода [15, 16].

Пристрої плавного пуску складаються з силової частини (напівпровідникові ключі – зазвичай тиристори або симістори), виміральної частини (датчики струмів і напруг мережі живлення) і системи керування (мікропроцесорної частини), що реалізує керування силовими ключами.

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих у роботах [17, 18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [19, 20] наведено дослідження режимів роботи асинхронного двигуна з пристроєм плавного пуску, у роботах [21, 22] – дослідження пристрою плавного пуску з системою керування, побудованою за принципом нейронної мережі.

З аналізу про застосування пристроїв плавного пуску визначено такі недоліки:

- виникнення при пусках великих гармонічних спотворень напруг у мережі живлення і особливо на клеммах двигуна, що пускається. Ймовірність появи резонансних посилень гармонік до неприйнятних рівнів за наявності мережі ємнісних елементів, наприклад конденсаторних батарей;

- поява при запусках значних за величиною коливань електромагнітних моментів на валу двигуна на частоті 300 Гц;

- поява в мережі змінного струму постійних складових струмів при реально можливих несиметриях у кутах регулювання тиристорів пристрою плавного пуску.

Також недоліком наведених робіт є відсутність оптимізації роботи тиристорного пускача за параметрами втрат потужності, відсутність оптимізації роботи за критерієм виходу пристрою плавного пуску в режим повного відкриття.

Отже, питання подальшого покращення енергоефективності пристроїв плавного пуску за критеріями зниження пускового моменту є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна, що дасть можливість знизити втрати потужності в силових напівпровідникових елементах пристрою плавного пуску. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розглянути запропоновану топологію пристрою плавного пуску та принцип його роботи;

- дослідити електромеханічні процеси, що протікають у пристрої плавного пуску при його роботі з асинхронним двигуном, за рахунок імітаційного комп'ютерного моделювання;

- проаналізувати розроблений фізичний прототип пристрою плавного пуску.

Основна частина дослідження.
Топологія пристрою плавного пуску.

Запропоновану топологію пристрою плавного пуску, відомого ще як тиристорний регулятор, реалізовано на силових симісторах і шунтуючих контакторах із застосуванням мікропроцесорної системи керування [23, 24]. Структурну схему пристрою плавного пуску наведено на рис. 1.

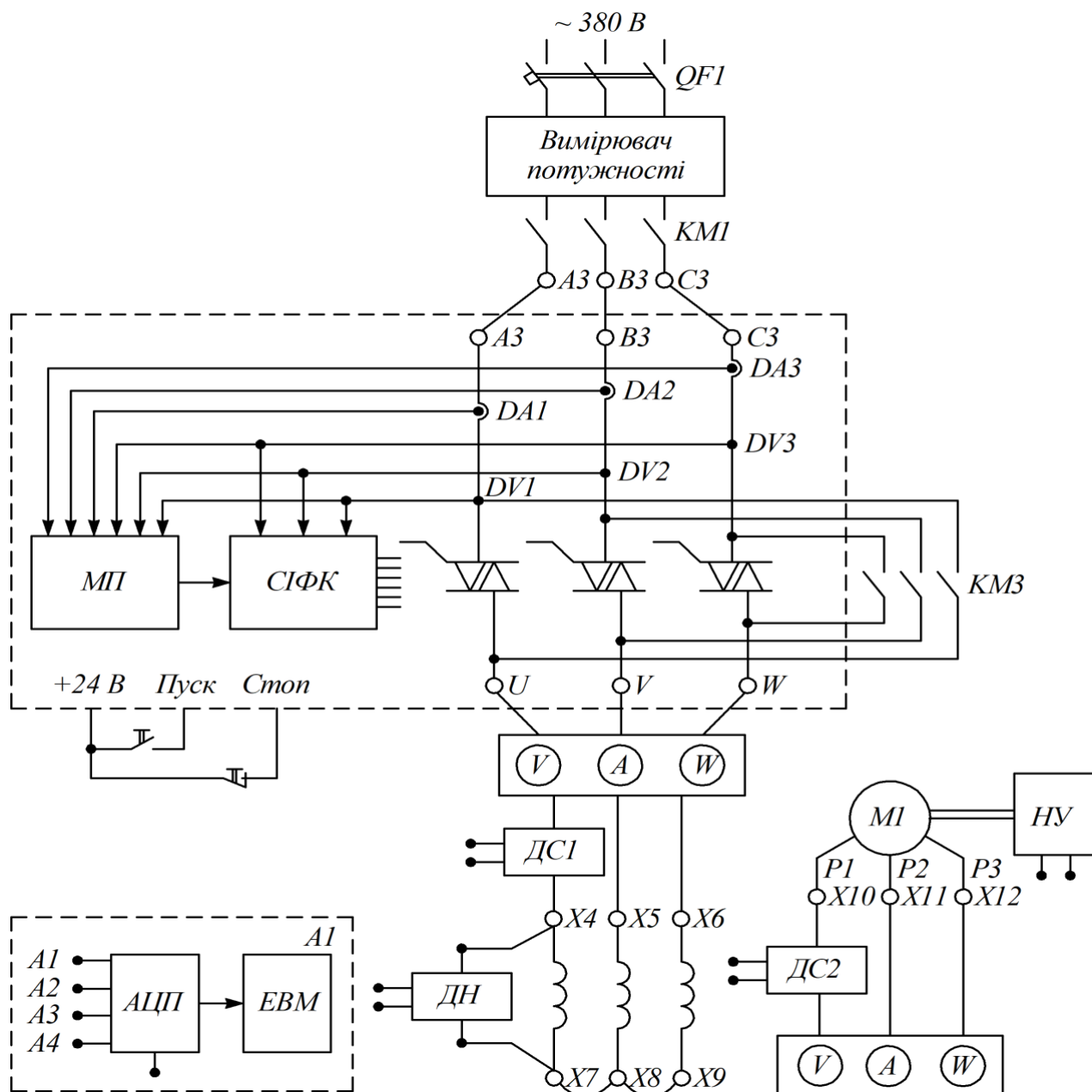


Рис. 1. Структурна схема пристрою плавного пуску

Керування пристрою плавного пуску реалізовано за допомогою системи імпульсно-фазового керування (СІФК), що засновано на пофазовому детектуванні переходу через нуль фазних напруг і фазовому автоналаштуванні частот опорних пилкоподібних сигналів, що керують силовими симісторами [25, 26]. Принцип роботи системи керування пристрою плавного пуску наведено на рис. 2.

Під час запуску асинхронного двигуна кут відкриття симісторів змінюється від 150° до 0° , після чого симістори шунтуються контакторами.

Час виходу на режим повного відкриття симісторів задається системою керування та суттєво впливає на величину пускового струму і пускового моменту двигуна.

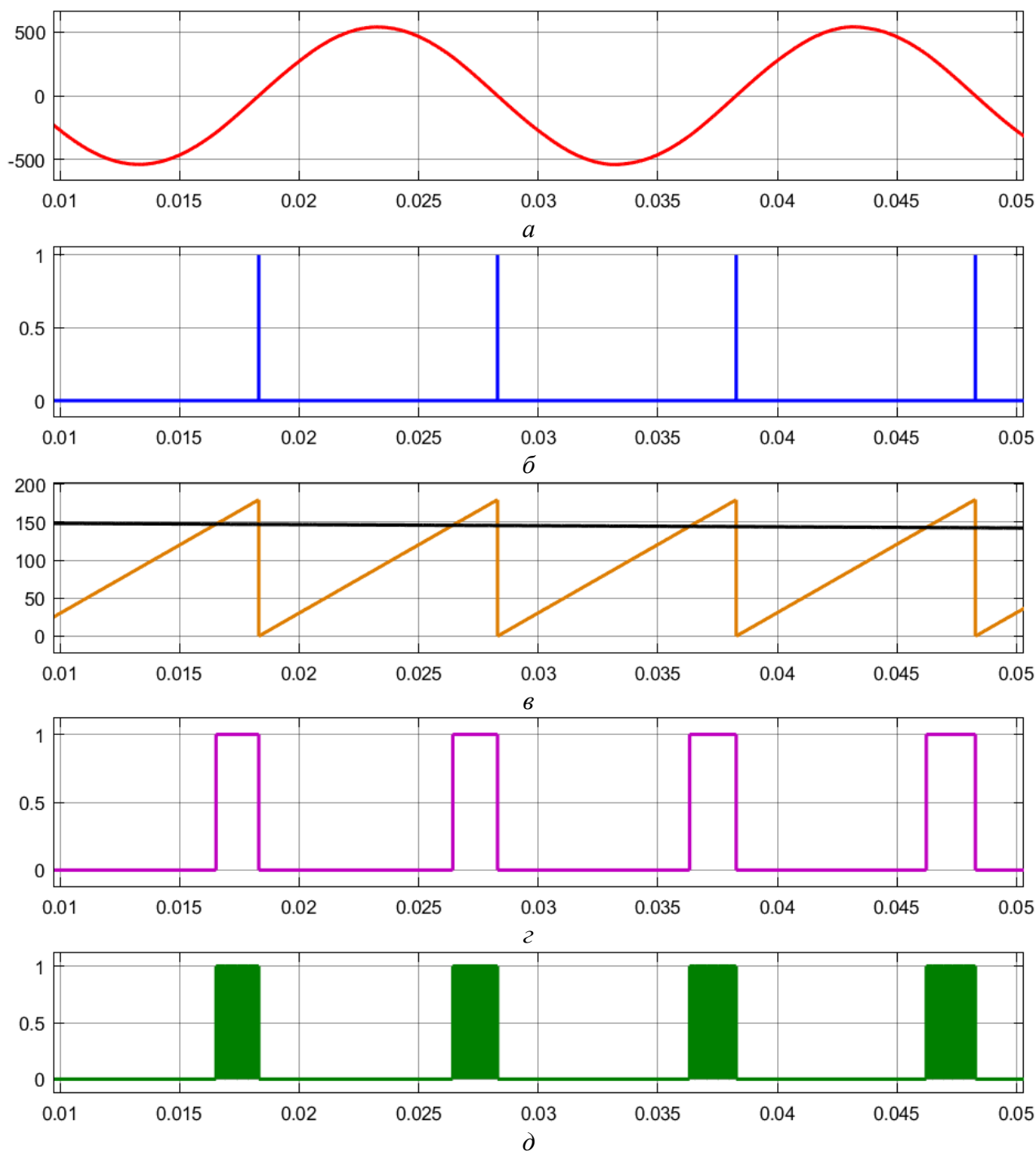


Рис. 2. Осцилограми керування пристрою плавного пуску фази А:
 a – фазна напруга; $б$ – детектор переходу через нуль фазної напруги;
 $в$ – опорний пилоподібний сигнал, синхронізований з фазовою напругою, і сигнал керування кутом відкриття силових ключів пристрою плавного пуску; $г$ – сигнал керування симістора; $д$ – дублювання імпульсів керування ключем для гарантованого вмикання

Моделювання системи плавного пуску асинхронного двигуна. У програмному середовищі Matlab/Simulink

було розроблено імітаційну модель симісторного пристрою плавного пуску з асинхронним двигуном (рис. 3).

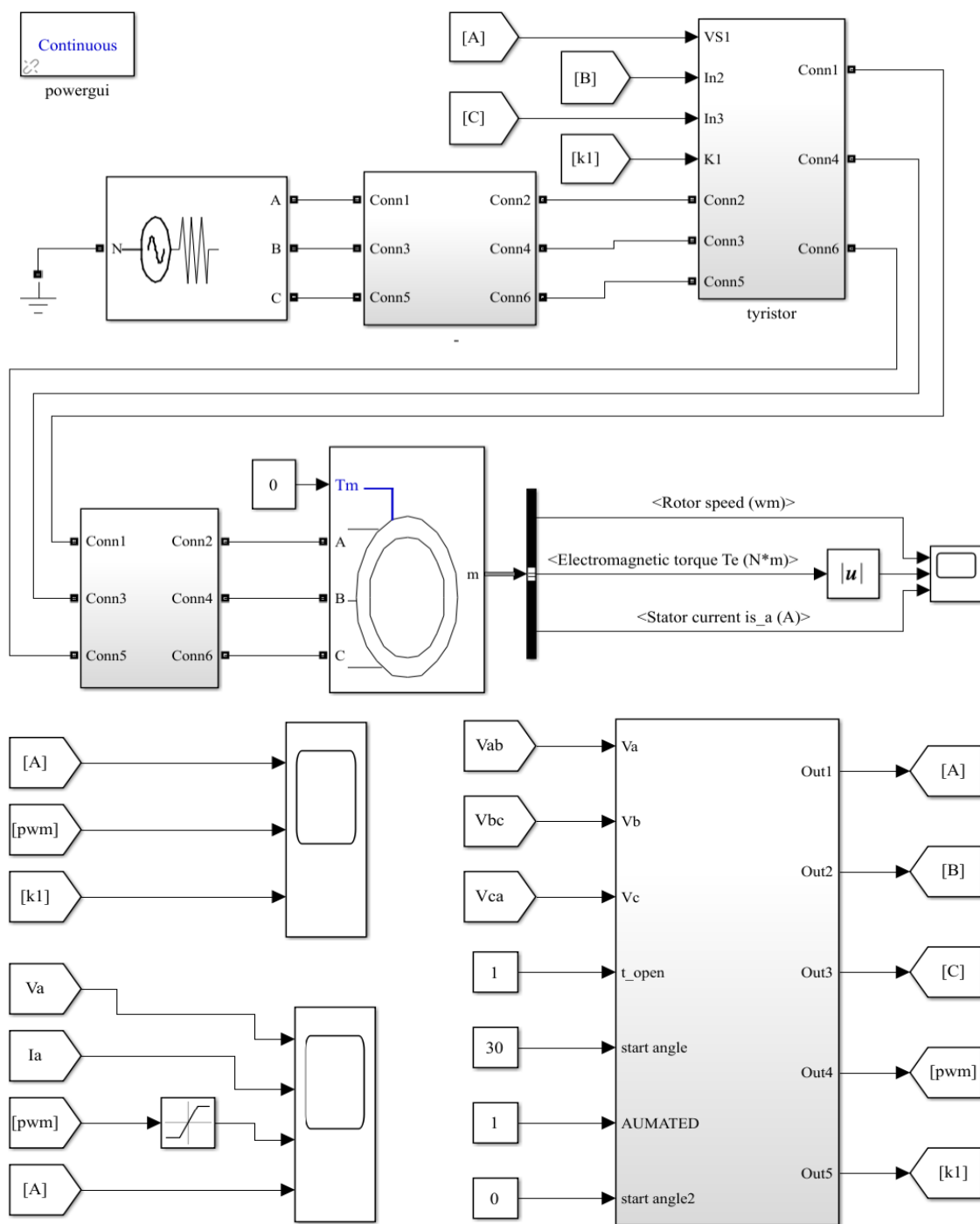


Рис. 3. Зовнішній вигляд імітаційної моделі пристрою плавного пуску з асинхронним двигуном

Розроблена модель дає змогу визначати стартовий кут відкриття силових ключів і час виходу на повністю відкритий режим.

Як навантаження пристрою плавного пуску було обрано типовий асинхронний

двигун потужністю 3 кВт з номінальною частотою обертання 1750 об/хв. Характеристики асинхронного двигуна наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики асинхронного двигуна

Параметр	Значення
Потужність, кВт	3
Частота обертання, об/хв	1750
Номінальна повна потужність, ВА	3,7
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	0,85
Номінальна лінійна напруга живлення V_{rms} , В	460
Опір обмотки статора R_s , Ом	1,11
Опір обмотки ротора R_r' , Ом	1,083
Індуктивність обмотки статора L_s , мГн	5,97
Індуктивність обмотки ротора L_r' , мГн	5,97
Взаємна індуктивність обмоток L_m , Гн	0,2037

Асинхронний двигун моделюється у вигляді схеми заміщення, що наведено на рис. 4 [27, 28]. На рисунку подано кутову

швидкість системи відліку ω та електричну кутову швидкість ω_r .

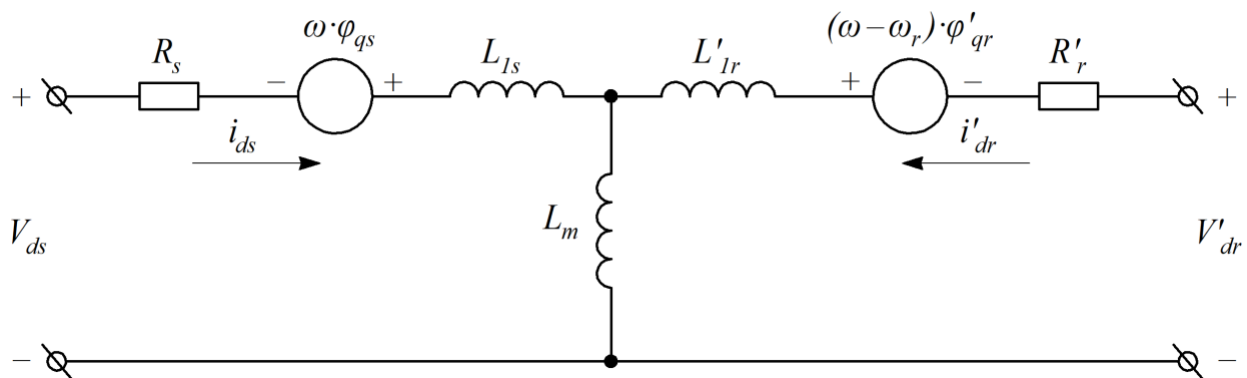


Рис. 4. Схема заміщення асинхронного двигуна

Моделювання роботи асинхронного двигуна засновано на чисельному розв'язанні системи диференціальних рівнянь [29, 30]

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr}; \\ \varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr}; \\ \varphi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}; \\ \varphi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds}; \\ L_s = L_{ls} + L_m; \\ L'_r = L'_{lr} + L_m. \end{cases} \quad (1)$$

Крім того, у моделі враховується ефект намагнічування і насичення асинхронного двигуна. Характеристика насичення асинхронного двигуна в імітаційній моделі наведено на рис. 5.

Субмодель системи керування силових ключів пристрою плавного пуску трьох фаз, що реалізує фазове автоналаштування частоти з формуванням опорних сигналів керування, наведено на рис. 6.

Перехідні процеси при прямому пуску асинхронного двигуна з моментом навантаження 20 Н·м наведено на рис. 7.

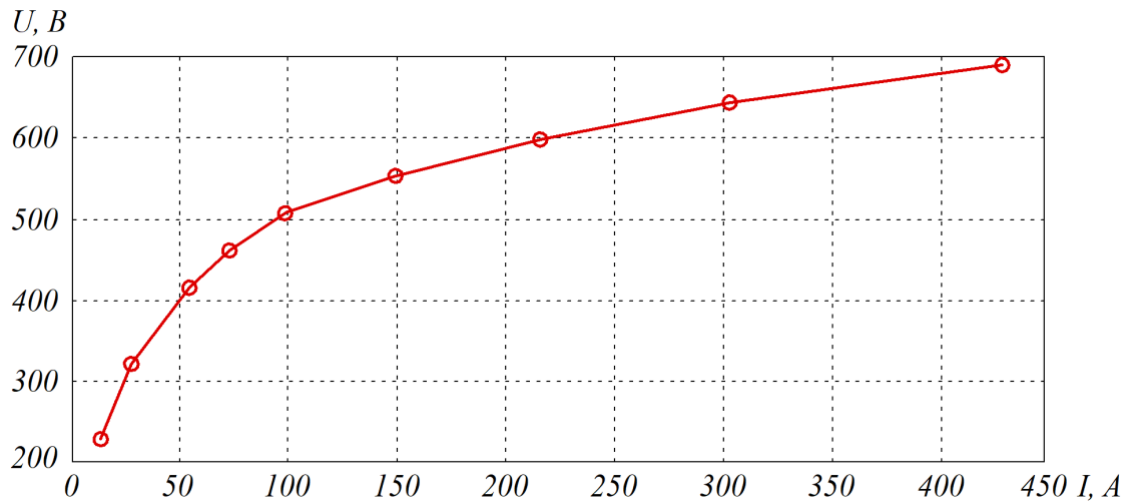


Рис. 5. Характеристика насичення асинхронного двигуна

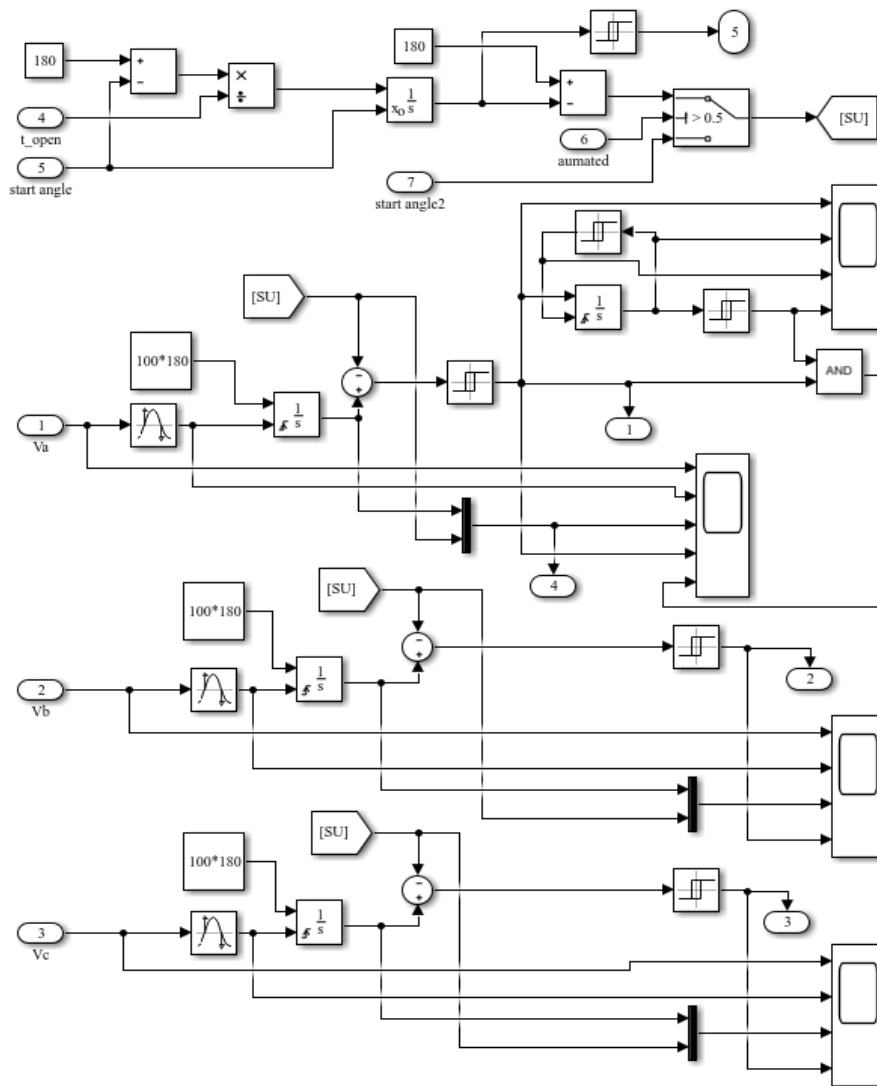


Рис. 6. Субмодель системи керування силовими ключів пристрою плавного пуску

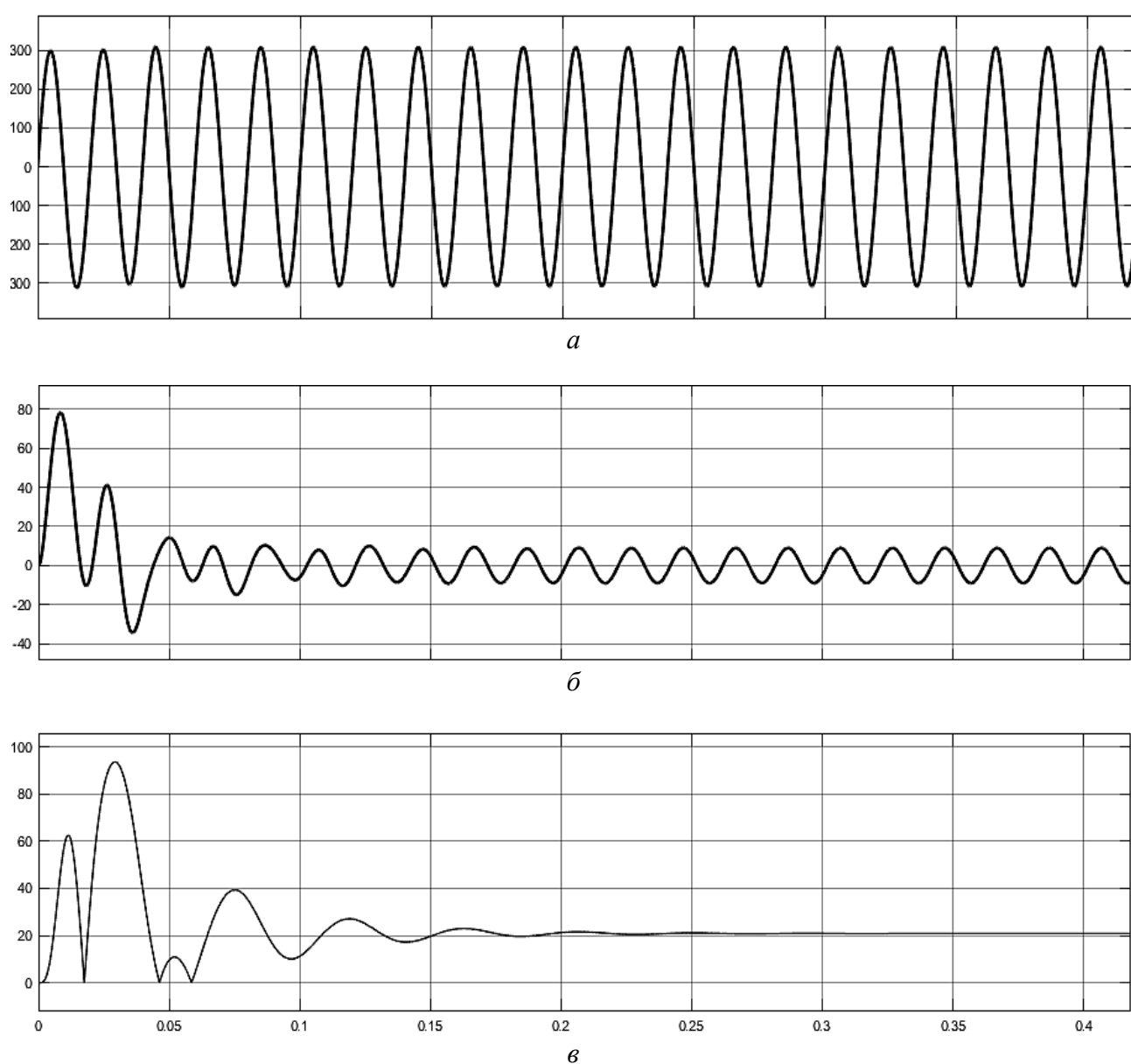


Рис. 7. Перехідні процеси при прямому пуску асинхронного двигуна:
 а – фазна напруга мережі; б – пусковий струм фази А; в – пусковий момент двигуна

У режимі прямого пуску двигуна від трифазної мережі змінного струму максимальна амплітудна величина пускового струму становить 80 А, а пусковий момент у режимі прямого пуску становить 85 Н·м. Подальшим завданням

роботи пристрою плавного пуску є зниження цих величин.

Осцилограми роботи пристрою плавного пуску при заданому часі розгону 0,7 с з моментом навантаження 20 Н·м наведено на рис. 8.

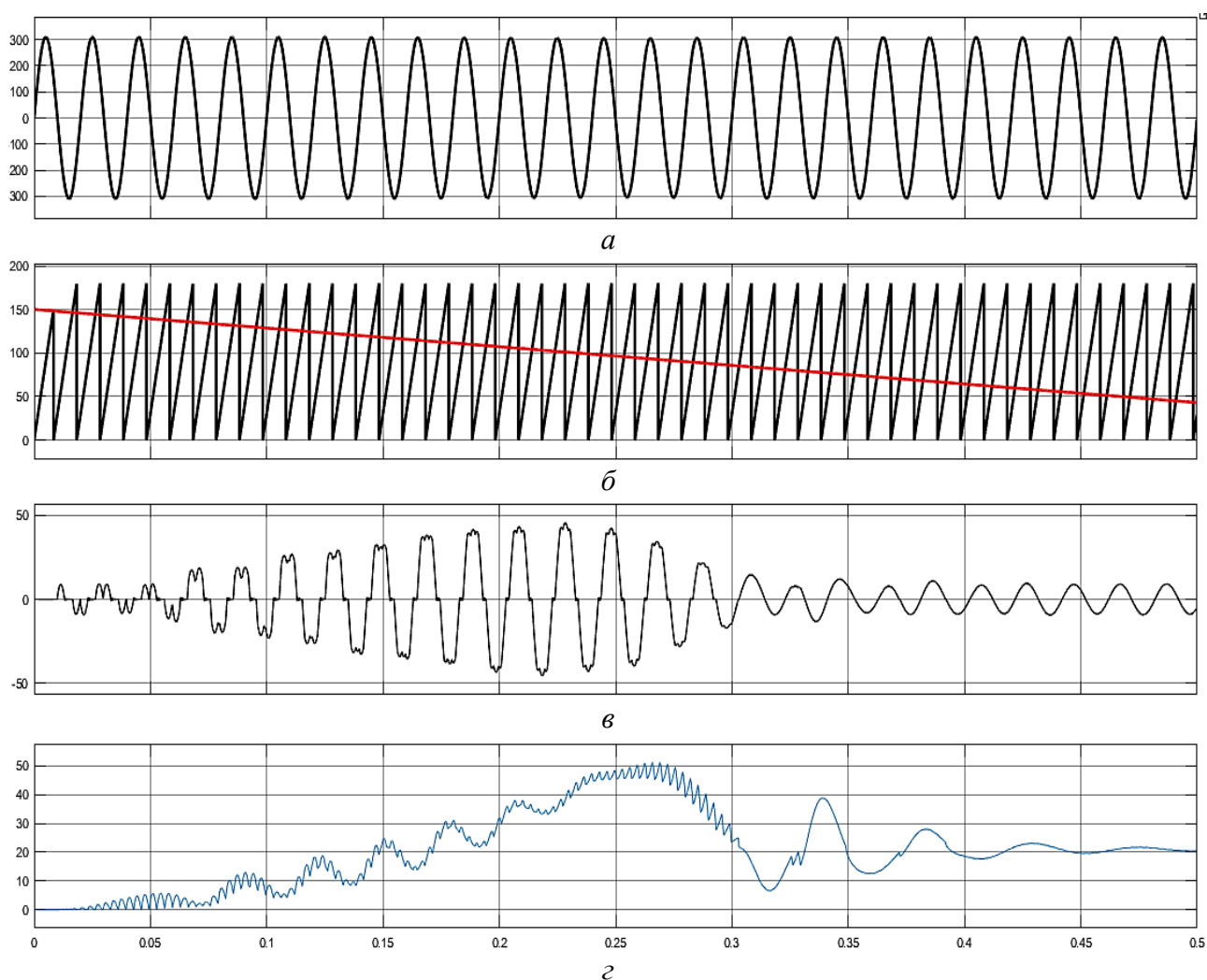


Рис. 8. Осцилограми роботи пристрою плавного пуску:
 а – фазна напруга мережі; б – опорний сигнал керування, синхронізований з напругою мережі; в – пусковий струм фази А; г – пусковий момент

З рис. 8 видно, що пристрій плавного пуску реалізує суттєве зниження величини пускового струму та пускового моменту асинхронного двигуна, саме зниження величини пускового струму з 80 до 44 А, а пускового моменту з 93 до 45 Н·м, що підвищує ресурс механічної частини двигуна та знижує рівень електромагнітної завади, що впливає на електричну мережу.

Дослідження коефіцієнта гармонічних спотворень фазного струму в процесі пуску наведено на рис. 9.

З рис. 9 видно, що під час роботи пристрою плавного пуску

середньоквадратичне значення струму двигуна зростає, а значення коефіцієнта гармонічних спотворень струму в початковий момент часу буде найгіршим і складатиме 53,25 % і в процесі пуску буде зменшуватись до нуля, поки форма струму не стане практично синусоїдальною.

Фізичний прототип пристрою плавного пуску. Проведені дослідження стали основою для створення фізичного прототипу пристрою плавного пуску на базі виробничих потужностей компанії ТОВ «ВО ОВЕН» (Харків, Україна). Мікропроцесорну та силову плати при-

строю плавного пуску наведено на рис. 10.

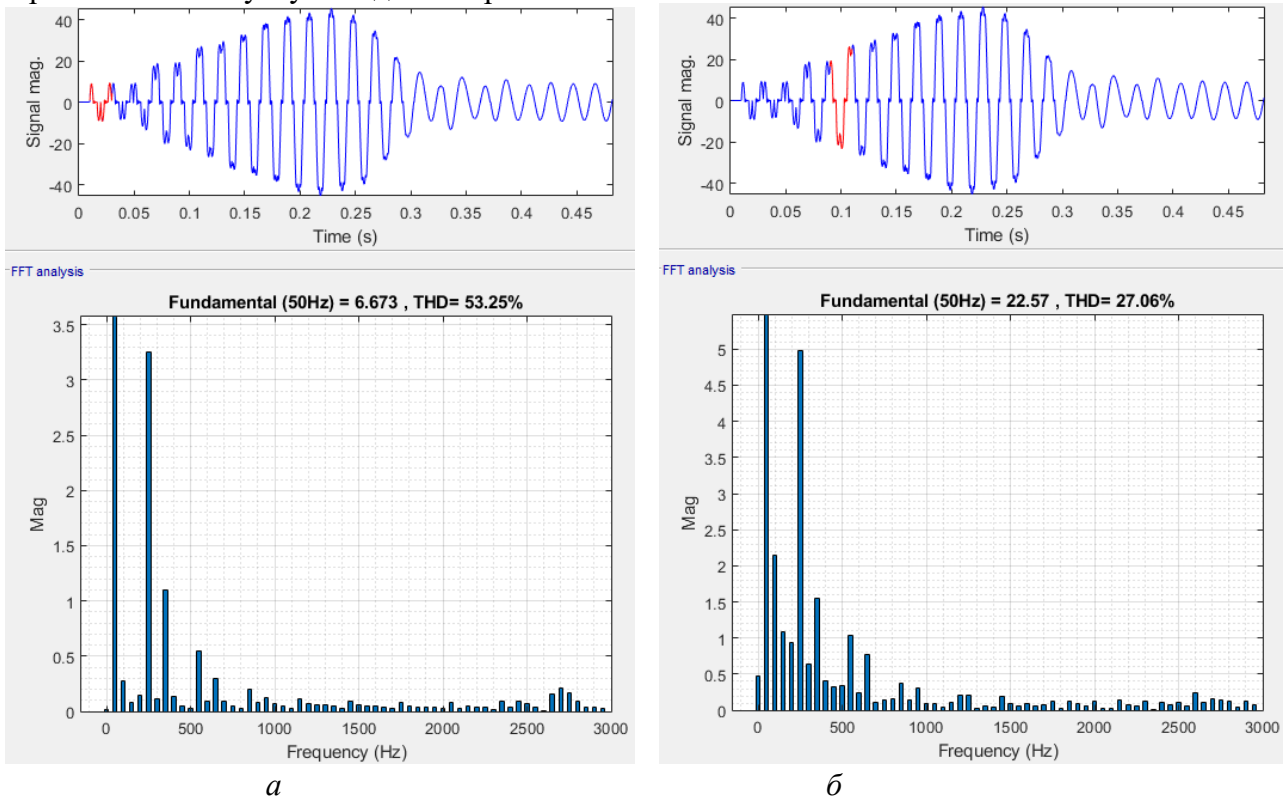


Рис. 9. Величини коефіцієнта гармонічних спотворень фазного струму:
a – початковий момент часу; *б* – процес пуску



a



б

Рис. 10. Плати пристрою плавного пуску: *a* – мікропроцесорна плата; *б* – силова плата
Технічні характеристики виготовленого пристрою плавного пуску наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики пристрою плавного пуску

Параметр	Значення
1	2
Робочий діапазон напруги мережі, В	3×170...480
Номінальна напруга мережі $U_{ном}$, В	3×380
Частота мережі, Гц	47...63
Час розгону/гальмування, с	2...20
Початкова напруга пуску, В	8
Час роботи тиристорів двох фаз без байпаса під час розгону та гальмування, с	2...20
Кількість пусків за годину	8
Напруга живлення змінного струму, В: – клеми А1 і А2 – клеми А2 і А3	94...264 330...480
Потужність споживання, Вт, не більше: – під час руху – гальмування	3 4
Напруга логічних входів (змінний струм), В	94...300
Комуруюча здатність реле, А: – при 30 В постійного струму – 400 В змінного струму категорії АС-11	6 2
Опір ізоляції, МОм, не менше	20
Електрична міцність ізоляції, В	3000
Режим роботи з байпасом, за ДСТУ EN 60947-4-2: – УПП2-75К-В, УПП2-90К-В, УПП2-110К-В – інші моделі	АС-53b:3-20:940 АС-53b:3-20:660
Ступінь захисту корпусу, за ДСТУ EN 60529: – УПП2-75К-В, УПП2-90К-В, УПП2-110К-В – інші моделі	IP00 IP20
Вібробійкість при впливі синусоїдальної вібрації частотою 13,2...100 Гц	0,7 g

Пристрій плавного пуску реалізовано з застосуванням силових симісторів і мікропроцесорної системи керування. Для роботи пристрою в режимі відсутності мережі живлення передбачено батарею типу CR2032.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі

проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– запропоновано систему керування пристрою плавного пуску, що дає змогу реалізовувати керування виходу кута керування на повністю відкритий режим за заданий оператором час;

– розроблено імітаційну модель пристрою плавного пуску з поданою

системою керування. Проведено дослідження енергетичних показників пристрою плавного пуску, а саме величини пускового моменту, пускового струму та коефіцієнта гармонічних спотворень форми фазного струму під час виходу на режим. Показано, що під час плавного пуску струм двигуна має лінійно зростаюче значення, а значення коефіцієнта гармонічних спотворень струму в початковий момент часу буде найгіршим, складатиме 53,25 % і в процесі пуску буде зменшуватись до нуля. Отже, якщо стоїть питання забезпечення вимог електромагнітної сумісності пристрою плавного пуску з мережею живлення, необхідним є застосування додаткових пасивних чи активних фільтрокомпенсуючих пристроїв;

– наведено результати розроблення фізичного прототипу пристрою плавного пуску з застосуванням запропонованої системи керування силових симісторів. Пристрій може бути використано для плавного пуску та зупинки асинхронних двигунів або регулювання потужності трифазного резистивного навантаження.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Shokarov D., Zachepa I., Zachepa N., Chorna V., Susyk D. The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 52–55. DOI: 10.1109/MEES.2017.8248950.
2. Iorgulescu D., Samoilescu G., Solcanu V., Balaceanu M., Barbulescu C., Bordianu A. Applications of the Asynchronous Motor in the Anchoring Installation – Simulation and Advantages. *2020 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. 2020. DOI: 10.1109/ISFEE51261.2020.9756133.
3. Bordianu A., Iorgulescu D., Puscasu S. Use of asynchronous electric motors in naval electric propulsion systems. *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. 2020. DOI: 10.1109/CPEE50798.2020.9238762.
4. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A., Evseev A. Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive. *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. 2018. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784.
5. Nikolaienko O., Antonov M. Asynchronous Electric Drive Based on Cascade Multi-Level Frequency Converter. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2019. P. 310–313. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896457.
6. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
7. Meshcheryakov V., Sibirtsev D., Valtchev S., Gracheva E. Control system for a frequency synchronized asynchronous electric drive. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021. Vol. 23. P. 116–126. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.
8. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse

width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.

9. Wang Q., Li H. A Kind of Soft Started Regulated Power Supply. *2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. 2020. P. 926–929. DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202366.

10. Tytiuk V., Rozhnenko Z., Baranovska M., Berdai A., Chorny O., Saravas V. Soft Starters of Powerful Electric Motors and Economic Aspects of Their Application. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. 2020. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240859.

11. Mohammadi M., Moghani J. S., Ansari S. A., Milimonfared J., Dehbashi A. Fuzzy logic based sensorless soft starter for constant frequency wind power plants. *2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*. 2018. P. 538–543. DOI: 10.1109/PEDSTC.2018.8343854.

12. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.

13. Rashevskaya M., Yanchenko S., Tsyruk S. Assessment of non-stationary harmonic distortion related to adjustable speed induction motor and soft starters. *2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*. 2018. DOI: 10.1109/SIELA.2018.8447097.

14. Meshcheryakov V. N., Evseev A. M., Boikov A. I. Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*. 2018. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341701.

15. Varalakshmi K., Bharathi B., Himaja T. Study of Soft-Starter based Induction Generator for Wind Energy Conversion System. *2021 Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*. 2021. DOI: 10.1109/ASIANCON51346.2021.9544993.

16. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.

17. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Syniavskiy A. V., Philipjeva M. V. Use of modern technologies in the problems of automation of data collection in intellectual power supply systems. *Modern engineering and innovative technologies*. 2022. Is. 19. Part 1. P. 38–51. DOI: 10.30890/2567-5273.2022-19-01-058.

18. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Khoruzhevskiy H. Study of energy parameters in alternative power source microgrid systems with multilevel inverters. *International scientific journal «Industry 4.0»*. 2020. Vol. 5. Is. 3. P. 118–121.

19. Liu N., Wang X., Hang C., Kong M., Li Z., Nie P. Asynchronous Starting Characteristics and Soft Start Method of the Brushless Doubly-Fed Motor. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2018. P. 1538–1542. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8549055.

20. Hu X., Si H., Ye Q., Tian X., Fang T. Research on Fuzzy Control System for Constant Current Soft Start of Motor. *2019 5th International Conference on Green Materials and Environmental Engineering*. 2019. Vol. 453. P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/453/1/012064.

21. Tuton M., Sharith D., Jubaer K. Artificial neural network based soft-starter for induction motor. *2015 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT)*. 2015. P. 228–233. DOI: 10.1109/EICT.2015.7391951.

22. Zhang W. Design of Programmable Soft Starter Control System. *Frontier Computing*. 2021. P. 1981–1988. DOI: 10.1007/978-981-16-0115-6_232.
23. Kosykh E. A., Udovichenko A. V. Research of a Soft Starter of an Induction Motor Based on Multi-Zone Transistor AC Voltage Regulator. *2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. 2020. P. 358–362. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153510.
24. Abdel A., Elgamal M., Abdel A.-H., Mahmoud E. E., Chen Z., Hassan M. A Proposed ANN-Based Acceleration Control Scheme for Soft Starting Induction Motor. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 4253–4265. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3046848.
25. Richardson M., Patterson V., Parchment A. Microcontroller Based Space Vector Pulse Width Modulation Speed Control of Three-phase Induction Motor. *SoutheastCon 2021*. 2021. DOI: 10.1109/SoutheastCon45413.2021.9401922.
26. Luke A. S., Majumdar I., Gupta S. K., Peter J., Athikkal S. Investigation on Space Vector Based Hybrid PWM Algorithm for Induction Motor Control. *2020 International Conference on Power Electronics and Renewable Energy Applications (PEREA)*. 2020. DOI: 10.1109/PEREA51218.2020.9339783.
27. Gugaliya A., Singh G., Shah V., Tamboli M., Bandekar A., Baviskar P. Availability Improvement of Induction Motors through Condition Monitoring. *2022 2nd Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*. 2022. DOI: 10.1109/ASIANCON55314.2022.9908908.
28. Smetanin V., Victor D., Lytkin V., Lukonin D., Dvoeglazov C. Induction motors for use in the strong power fields equipment for processing spent nuclear fuel in the special module of the prototype mixing device for an energy complex. *2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED)*. 2021. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462289.
29. Tytiuk V., Zachepa I., Rudenko N., Chenchevoi V., Prokopenko V., Kobiliansky B. Mathematical Modeling of a Special Induction Motor With a Double Squirrel Cage Rotor. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598749.
30. Shestakov A. V. Modeling and Experimental Analysis of Dynamic Characteristics of Asynchronous Motor. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743061.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Шелест Дмитро Андрійович, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Тел.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6095-658X.

Синявський Андрій Владиславович, аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9588-6737.

Plakhtii Olexandr Andrievych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

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

Hordiienko Denys Anatolievych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Shelest Dmytro Andriyovych, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Tel.: +38 (066) 973-05-67. E-mail: shelllogist@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6095-658X.

Syniavskyi Andrii Vladyslavovych, postgraduate of Department of Transport Communications, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 634-39-00. E-mail: andreivladislavovich10@gmail.com. ORCID: 0000-0001-9588-6737.

Статтю прийнято 20.10.2022 р.

УДК 629.423:621.31

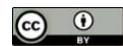
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Канд. техн. наук А. О. Сулим

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO DETERMINING THE PARAMETERS OF A CAPACITIVE ENERGY STORAGE FOR ELECTRIC ROLLING STOCK

PhD (Tech.) A. O. Sulym

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273623>



Анотація. У статті наведено та виконано порівняльний аналіз існуючих підходів з визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для електрорухомого складу. Визначено потужність та енергоємність бортових ємнісних накопичувачів енергії для кожного з розглянутих підходів для однакових заданих умов експлуатації електрорухомого складу, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01. Визначено термін окупності та вплив на експлуатаційні показники електрорухомого складу систем накопичення з обраними параметрами за умови застосування різних підходів. Встановлено, що доцільним є застосування підходів, які ґрунтуються на визначенні раціональних параметрів з використанням теоретичних досліджень за допомогою програмних засобів і багатокритеріальних методів оцінювання.

Ключові слова: ємнісний накопичувач енергії, метрополітен, підхід, порівняльний аналіз, електрорухомий склад.

Abstract. The article deals with the main existing approaches to determining the parameters of on-board capacitive energy storages for electric rolling stock and their comparative analysis. The advantages and disadvantages of each of the ten considered approaches are set out. Each of the approaches is described and their comparative analysis is performed according to such criteria as the level of research complexity, the financial component of research, the possibility of taking into account the real operation conditions of electric rolling stock while carrying out the research,

the method of evaluating the parameters of the on-board capacitive energy storage, the possibility of determining rational parameters, the universality of the approach, considering the technical and economic component and limitations on weight and size of indicators. The power and energy capacity of on-board capacitive energy storage devices, their weight-size indicators when applying each of the considered approaches for the same given operating conditions of the electric rolling stock are determined. A five-car articulated vehicle with an asynchronous traction drive and recovery systems, consisting of metro cars of models 81-7080, 81-7081, 81-7081-01, was chosen as the electric rolling stock. The experimental section between the final stations of the Sviatoshynsk-Brovary line of the utility company "Kyivskyi Metropolitan" was chosen as the specified operating conditions. The payback period and the impact of storage systems with the selected parameters on the performance indicators of the given electric rolling stock while using various approaches are determined. It was found that the most developed approaches, the key point of which is the selection of rational parameters using theoretical research with the help of application-specific software and multi-criteria evaluation methods. The feasibility of using a multi-criteria approach, which allows choosing rational parameters of the capacitive energy storage for electric rolling stock based on three important evaluation criteria, i.e., weight, volume and payback period, is demonstrated. It was established that it is rational to use an on-board capacitive energy storage device of low power and energy intensity.

Keywords: *capacitive energy storage, metro, approach, comparative analysis, electric rolling stock.*

Вступ. Одним з важливих і актуальних питань під час створення інноваційного електрорухомого складу з накопичувачами енергії є визначення їхніх енергетичних параметрів, у першу чергу потужності та енергоємності. Це питання потребує свого вирішення, як правило, за відомих заданих умов експлуатації (характеристик електрорухомого складу, ділянки експлуатації та профілю колії тощо). Важливість вирішення цього питання полягає в тому, що завдяки впровадженню систем накопичення енергії з раціональними параметрами можна досягти максимального економічного ефекту і мінімального терміну їхньої окупності, що в цілому дозволить знизити собівартість перевізного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазначеному питанню приділено достатньо уваги в дослідженнях як вітчизняних, так і закордонних вчених. Дослідженнями в цьому напрямі займалися такі вітчизняні вчені: Дибрін С. В., Жемеров Г. Г., Костін М. О., Рибалко А. Я., Муха А. М., Любарський Б. Г.,

Омельяненко В. І., Рябов Є. С., Сидоренко А. М., Яцько С. І. та інші. Серед закордонних вчених слід виділити дослідження Васильєва В. А., Єлисеєва Д. А., Лиманського С. С., Мятажа А. В., Фурсова С. А., Шевлюгіна М. В., Штанга А. А., Щурова М. І., Ярославцева М. В., Hillmarsen S., Iannuzzi D., Lewandowski M., Radu P. V., Ratniyomchai T., Szelag A., Szêñâsy I., Tricoli P., Wiczorek M.

Ученими запропоновано ряд методів, концепцій і підходів (далі підходи) щодо визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) для електрорухомого складу. Умовно ці підходи можна поділити на дві групи: з використанням методів теоретичних та експериментально-розрахункових досліджень.

В основу цих досліджень покладено використання таких методів та основних положень: положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування, методи аналізу характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперації, положень теорії

імовірності, теоретичні основи електротехніки, методи техніко-економічного аналізу, математичної статистики, математичного і комп'ютерного моделювання та інші.

За результатами аналізу робіт вищезазначених авторів наведено основні підходи, виконано порівняльний аналіз, сформульовано переваги і недоліки кожного з них.

Перший підхід. Найбільш простим технічним рішенням у цьому напрямі є розміщення бортового ЄНЕ значної потужності та енергоємності, здатного зберігати і повторно використовувати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу під час заданих умов його експлуатації [1, 2]. Це технічне рішення можна застосовувати за відомих умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації, отриманих під час теоретичних або експериментальних досліджень [3]. Суть процедури полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ за аналізом динаміки споживання та рекуперації електроенергії складом. Основними факторами, що стримують впровадження такого технічного рішення, є вартісні та масогабаритні показники бортового ЄНЕ. Тому в сучасних умовах розвитку на перший план виходить пошук технічних рішень, за яких застосовуються бортові ЄНЕ незначної потужності та енергоємності [4].

Другий підхід. У наявних дослідженнях [5, 6] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ за оцінюванням кількості кінетичної енергії електрорухомого складу. Суть цього підходу полягає у здійсненні вибору параметрів бортового ЄНЕ за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування рухомого складу від швидкості початку гальмування. За цим підходом можна визначати потужність і кількість рекуперативного гальмування як для максимальної експлуатаційної швидкості руху складу, так і швидкості

руху, за якої найчастіше здійснюється рекуперативне гальмування (за графіком розподілу швидкості початку гальмування). У першому випадку параметри бортового ЄНЕ визначаються методом теоретичних досліджень за технічними характеристиками електрорухомого складу [7, 8], другому – методом експериментально-розрахункових досліджень за відомих умов експлуатації та технічних характеристик електрорухомого складу [5, 6]. Загальними перевагами обох випадків є простота і швидкість отримання результату. Оцінка тільки за технічними параметрами електрорухомого складу є досить грубою і не враховує низки факторів, зокрема реальних умов експлуатації складу (профілю колії, зміни завантаженості, графіка руху, сили гальмування, наявності електропневматичного гальмування тощо). В іншому випадку оцінка є менш грубою, але присутні такі недоліки: неможливість урахування зміни завантаження, електропневматичного гальмування (за наявності), визначення параметрів бортового ЄНЕ виконується за єдиним критерієм – найчастішою швидкістю початку гальмування, що не враховує техніко-економічну складову такого вибору.

Третій підхід. У роботі [10] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ за тяговими характеристиками поїзда з урахуванням обмеження споживання струму тягової мережі. Підхід у цій роботі базується на визначенні параметрів за характеристиками роботи тягового асинхронного привода електрорухомого складу і передбачає використання основних положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування. Недоліками цього способу оцінювання є те, що не враховано профіль колії, графік руху, наявність електропневматичного гальмування, а також існують обмеження у сфері застосування. Підхід передбачає визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ тільки для електрорухомого

складу з частотно-регульованим тяговим асинхронним електроприводом.

Четвертий підхід. У дослідженнях [11, 12] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначити шляхом використання основних положень теорії імовірності. Основна ідея запропонованого підходу в цих роботах полягає у визначенні параметрів за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування. Побудова характеристик (гістограм) виконується за результатами обробки осцилограм, отриманих експериментально під час реальних умов експлуатації електрорухомого складу. Зазначене оцінювання передбачає побудову гістограм з урахуванням усіх типових умов експлуатації складу протягом певного проміжку часу. Недоліком цього підходу є те, що вибір параметрів виконується на основі запропонованих критеріїв, які не дають змогу обґрунтувати визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ, а також не враховується техніко-економічна складова такого вибору. Слід зазначити, що перевагами цього підходу є врахування реальних умов експлуатації поїзда (профілю колії, завантаженості, сили гальмування тощо).

П'ятий підхід. У роботі [13] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначити, використовуючи теоретичні основи електротехніки, з урахуванням умов, головною з яких є та, щоб при цьому спостерігався аперіодичний чи граничний режим розряду ЄНЕ. Цей підхід заснований на застосуванні теоретичних методів досліджень (чисельних розрахунків з використанням основ електричної тяги та електротехніки). Суттєвим недоліком цього підходу є обмеження у сфері застосування. Такий підхід передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ для рухомого складу з електроприводом постійного струму послідовного збудження. До інших недоліків слід віднести неможливість урахування

реальних умов експлуатації та різних режимів ведення складу.

Шостий підхід. У дослідженнях [14, 15] визначити параметри бортового ЄНЕ (потужності, енергоємності, діапазону робочих напруг тощо) запропоновано шляхом побудови осцилограм споживання та рекуперації електричної енергії під час руху складу за заданим маршрутом з використанням імітаційної комп'ютерної моделі. При цьому параметри визначають за середніми значеннями потужності та кількості електроенергії за один робочий цикл. Перевага цього підходу полягає у врахуванні реальних умов експлуатації складу, можливості врахування зміни завантаження на станціях, незначних фінансових ресурсах і середніх витратах часу під час виконання досліджень. Недоліки – визначення параметрів бортового ЄНЕ виконується за середніми значеннями потужності та енергоємності, що не дозволяє здійснювати вибір його раціональних параметрів; не враховується техніко-економічна складова такого вибору, а також обмеження за масогабаритними параметрами, враховується тільки один циклічний режим руху.

Сьомий підхід. У роботах [16, 17] вибір параметрів бортового ЄНЕ пропонується здійснювати за критерієм мінімального терміну окупності систем накопичення. Під системою накопичення розуміється бортовий ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач, система керування енергообмінними процесами між бортовим ЄНЕ і тяговим електроприводом та інше комплектуюче обладнання. Суть цього підходу полягає у визначенні параметрів за результатами аналізу характеристик (діаграм) терміну окупності обраних систем накопичення залежно від потужності та енергоємності їхнього бортового ЄНЕ. Цей підхід передбачає проведення експериментально-розрахункових досліджень. Перевага застосування цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів

бортового ЄНЕ за досить важливим критерієм, що враховує техніко-економічну складову під час здійснення вибору. При цьому враховуються реальні умови експлуатації електрорухомого складу з системами рекуперації. Недоліком такого підходу є тривалість виконання розрахунків, визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ здійснюється за одним критерієм – терміном окупності.

Восьмий підхід. У роботі [18] визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ відбувається за двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Вирішення двокритеріальної задачі для цього підходу відбувається за методом послідовних поступок. Спочатку вирішується завдання визначення обмеження за масою, а потім виконується пошук рішення за головним критерієм – мінімальним терміном окупності. Цей підхід передбачає проведення експериментально-розрахункових досліджень. Перевага підходу – урахування реальних умов експлуатації поїзда, техніко-економічної складової, вибір раціональних параметрів за двома критеріями. Недоліки – використання експериментальних даних потребує значних фінансових ресурсів для проведення таких досліджень, складність і тривалість виконання розрахунків.

Дев'ятий підхід. У дослідженнях [19, 20] вибір параметрів бортових ЄНЕ відбувається за двома критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Підхід у цих роботах аналогічний підходу в роботі [18]. Основною різницею є застосування теоретичного методу дослідження шляхом застосування спеціалізованої комп'ютерної програми для моделювання руху складу замість даних експериментальних досліджень. Переваги порівняно з дослідженням у роботі [18] – можливість урахування зміни завантаження на станціях, значне зменшення фінансових

витрат на проведення досліджень, зменшення термінів виконання досліджень. Недоліком підходу є неможливість урахування раціональних режимів ведення на заданій ділянці, оскільки моделювання руху виконується для заданих штатних типових режимів ведення, а також тривалість виконання розрахунків.

Десятий підхід. У роботі [21] вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ пропонується здійснювати за трьома критеріями – обмеженнями за масою, об'ємом і мінімальним терміном окупності системи накопичення. В основі підходу закладено використання спеціалізованої комп'ютерної програми. Ця програма здатна визначати раціональні режими ведення електрорухомого складу на заданій ділянці колії за критеріями заданого часу руху та мінімального споживання електроенергії з контактної мережі. Суть цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів бортових ЄНЕ (потужності та енергоємності) за допомогою вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію. Як головний критерій обрано мінімальний термін окупності системи накопичення, на інші два критерії – маса та об'єм системи накопичення – встановлено обмеження. Спочатку вирішується завдання визначення обмеження за масою та об'ємом, а потім виконується пошук рішення за головним критерієм – мінімальним терміном окупності. Обмеження накладаються з урахуванням технічних характеристик електрорухомого складу.

Переваги підходу – урахування реальних умов експлуатації електро-рухомого складу, можливість врахування зміни його завантаження, урахування техніко-економічної складової, обмежень за масогабаритними показниками, вибір параметрів здійснюється за раціональними режимами ведення складу, що визначаються за критерієм мінімального споживання електроенергії з контактної мережі, зменшення часу виконання

досліджень порівняно з підходами, в основу яких покладено проведення експериментальних досліджень, універсальність. Недоліки – складність і тривалість виконання досліджень.

У цій роботі запропоновано більш детально розглянути існуючі підходи до визначення параметрів бортових ЄНЕ з використанням конкретного типу електрорухомого складу та заданих умов його експлуатації.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є виконання порівняльного аналізу існуючих підходів з визначення параметрів ємнісного накопичувача енергії для електрорухомого складу. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- виконати порівняльний аналіз підходів за різними критеріями оцінювання;

- визначити параметри бортового ємнісного накопичувача енергії на прикладі конкретного типу електрорухомого складу та заданих умов його експлуатації з застосуванням розглянутих підходів;

- визначити перспективні підходи з вибору параметрів ємнісного накопичувача енергії для електрорухомого складу з урахуванням різних критеріїв оцінювання за результатами їхнього комплексного порівняльного аналізу.

Основна частина дослідження. Для кожного з розглянутих підходів виконано порівняльний аналіз за такими критеріями: рівень складності виконання досліджень (витрати часу), фінансова складова досліджень, можливість урахування реальних умов експлуатації електрорухомого складу, метод оцінювання параметрів бортового ЄНЕ, можливість визначення раціональних параметрів, універсальність підходу, урахування техніко-економічної складової та масогабаритних показників системи накопичення під час вибору.

Критерій рівня складності або витрати часу на виконання досліджень умовно має

таку класифікацію: простий (можливість проведення досліджень протягом одного дня), середній (від двох до п'яти днів), складний (більше п'яти днів). Фінансова складова передбачає значні, середні або незначні фінансові витрати. Цей критерій визначається за результатом порівняльного аналізу фінансових витрат розглянутих підходів між собою. До критерію врахування реальних умов експлуатації належать профіль колії, графік руху, зміна завантаження електрорухомого складу, наявність електропневматичного гальмування, урахування обмеження швидкості руху на заданій ділянці тощо. Кожен з підходів щодо визначення параметрів бортового ЄНЕ має свій критерій оцінювання, що вказується під час порівняльного аналізу. У разі можливості визначення раціональних параметрів бортового накопичувача вказуються критерії оцінювання, за якими вони визначаються (один або декілька). Підхід вважається універсальним, якщо його можна застосовувати для електрорухомого складу з різним типом електропривода та вибору різних систем накопичення, класифікованих за фізичним принципом (ємнісних, інерційних, електрохімічних тощо). Результати порівняльного аналізу для кожного з розглянутих підходів, наведено в табл. 1.

Далі в цій роботі пропонується виконати порівняльний аналіз підходів до визначення параметрів бортового ЄНЕ на прикладі конкретного типу електрорухомого складу для заданих умов його експлуатації. Як склад прийнято модернізований поїзд метрополітену, що являє собою п'ятивагонний зчеп з асинхронним тяговим приводом і системами рекуперації, у якого головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні. Поїзд складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 (рис. 1).

Технічні характеристики поїзда метрополітену та параметри тягової передачі наведено в табл. 2.

Результати порівняльного аналізу підходів

Підхід/метод досліджень	Критерій для здійснення порівняльного аналізу					
	Рівень складності виконання досліджень	Фінансова складова досліджень (витрати)	Можливість урахування реальних умов експлуатації	Метод оцінювання параметрів бортового СНЕ	Можливість визначення раціональних параметрів	Універсальність підходу, урахування техніко-економічної складової та масогабаритних показників системи накопичення
1	2	3	4	5	6	7
Перший підхід/теоретичний або експериментально-розрахунковий	Простий	Середні	Враховує реальні умови експлуатації	За максимальними значеннями потужності та енергоємності енергії рекуперації	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Другий підхід (I)*/теоретичний або експериментально-розрахунковий	Простий	Незначні	Оцінка є досить грубою і не враховує низки факторів, зокрема профілю колії, графіка руху тощо	За оцінюванням кількості кінетичної енергії складу під час гальмування з максимальної швидкості	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Другий підхід (II)*/експериментально-розрахунковий	Простий	Середні	Не враховуються деякі реальні умови експлуатації (зміна завантаження, наявність комбінованого гальмування)	За оцінюванням кількості кінетичної енергії складу (за аналізом графіка кількості енергії рекуперативного гальмування складу від швидкості початку гальмування)	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Третій підхід/ теоретичний	Простий	Незначні	Не враховано реальні умови експлуатації (профіль колії, графік руху, наявність електропневматичного гальмування), а також існують обмеження у сфері застосування	Шляхом застосування основних положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування за умов обмеження струму споживання з контактної мережі (за технічними характеристиками електро-рухомого складу)	Відсутня	Підхід не є універсальним, обмеження у сфері застосування, передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ тільки для рухомого складу з частотно-регульованим тяговим асинхронним електроприводом, не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Четвертий підхід/ експериментально-розрахунковий	Середній	Значні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом використання основних положень теорії імовірності (за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування)	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
П'ятий підхід/ теоретичний	Середній	Незначні	Не враховано реальні умови експлуатації (профіль колії, графік руху, наявність комбінованого гальмування), а	Шляхом використання чисельних розрахунків з використанням основних положень теорії	Відсутня	Підхід не є універсальним, обмеження у сфері застосування, передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ тільки для тягових

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
			також існують обмеження у сфері застосування	електричної тяги та електротехніки		одиниць з двигунами постійного струму послідовного збудження, не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Шостий підхід/ теоретичний	Середній	Незначні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом використання методів математичного і комп'ютерного моделювання (за середніми значеннями потужності та енергоємності)	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Сьомий підхід/ експериментально-розрахунковий	Складний	Значні	Ураховує реальні умови експлуатації	За результатами аналізу характеристик (діаграм) терміну окупності обраних систем накопичення залежно від потужності та енергоємності бортового СЧЕ	За критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, враховує техніко-економічну складову, але не враховує масогабаритні показники системи накопичення
Восьмий підхід/ експериментально-розрахунковий	Складний	Значні	Ураховує реальні умови експлуатації	Вирішення двокритеріальної задачі за методом головного критерію. Спочатку розв'язується задача визначення обмеження за масою, а потім виконується пошук рішен-	За двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, враховує техніко-економічну складову та показники маси системи накопичення, не враховує габарити системи накопичення

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
				ня за головним критерієм – мінімальним терміном окупності		
Дев'ятий підхід/теоретичний	Складний	Незначні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом застосування спеціалізованої комп'ютерної програми для моделювання руху електрорухомого складу. Визначення параметрів за двома критеріями – масою та мінімальним терміном окупності	За двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, ураховує техніко-економічну складову та показники маси системи накопичення, не враховує габарити системи накопичення
Десятий підхід/теоретичний	Складний	Незначні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом застосування спеціалізованої комп'ютерної програми для моделювання руху електрорухомого складу. Визначення параметрів за трьома критеріями	За трьома важливими критеріями – обмеженням за масою, об'ємом і мінімальним терміном окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, ураховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення. Спеціалізована програма дає змогу визначити раціональний режим ведення електрорухомого складу за заданим часом руху та мінімальним споживанням електроенергії з мережі

Примітка*. Другий підхід з позначкою I передбачає визначення параметрів бортового ЄНЕ за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу від максимально можливої швидкості початку гальмування складу (за технічними характеристиками поїзда); з позначкою II – за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування поїзда від найчастішої швидкості початку гальмування електрорухомого складу на заданій ділянці (за відомих умов експлуатації складу).



Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідного поїзда метрополітену

Таблиця 2

Технічні характеристики поїзда метрополітену та тягової передачі

Номер з/п	Параметр	Значення
1	Маса поїзда метрополітену m , т	
	– у порожньому стані;	155,3
	– за номінального завантаження;	246,9
	– максимального завантаження	262
2	Зчіпна вага моторного вагона $G_{зч}$, кН	
	– у порожньому стані;	312,0
	– за номінального завантаження;	494,4
	– максимального завантаження	543,5
3	Кількість вагонів Q , шт.	5
4	Конструкційна швидкість V_k , км/год	90
5	Максимальна експлуатаційна швидкість V , км/год	80
6	Діаметр колеса D_k , м	0,825
7	Напруга на струмоприймачі вагона U_{st} , В	
	– у режимі тяги;	825
	– режимі вибігу;	875
	– режимі гальмування	908
8	Коефіцієнт інерції обертових мас $(1+\gamma)$	
	– у порожньому стані;	1,1
	– за номінального завантаження;	1,08
	– максимального завантаження	1,06
9	Передаточне число редуктора μ	6,95
10	Коефіцієнт корисної дії редуктора $\eta_{ред}$, %	98
11	Коефіцієнт корисної дії інвертора $\eta_{інв}$, %	96
12	Маса ТАД, не більше, $m_{дв}$, кг	700

Параметри тягових асинхронних двигунів (ТАД), встановлених на модернізованому поїзді метрополітену, такі: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $n_n = 1900$ об/хв; $f_n = 65$ Гц; $M_n = 2,21$ кН · м. Графіки залежностей сили тяги та гальмування від швидкості цього поїзда зображено на рис. 2. Характеристику основного опору руху поїзда наведено на рис. 3. Графік кількості електроенергії

рекуперації поїзда від швидкості руху зображено на рис. 4.

Як задані умови експлуатації обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Дослідження та порівняльний аналіз виконано з урахуванням типових штатних умов експлуатації поїзда протягом доби.

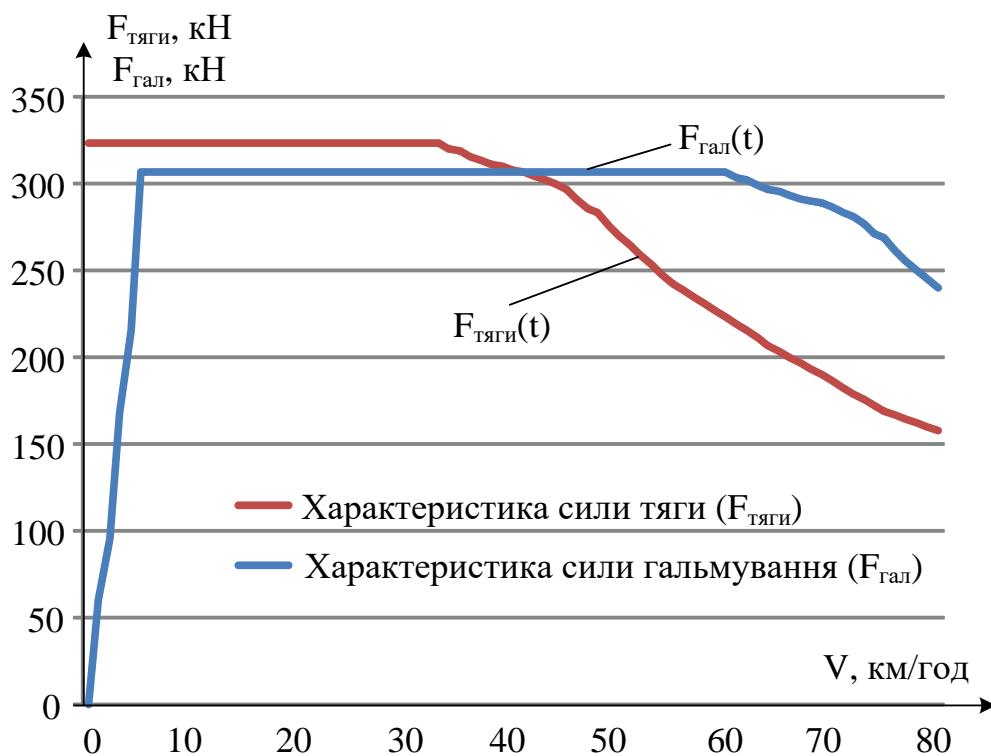


Рис. 2. Графіки залежностей сили та гальмування від швидкості руху

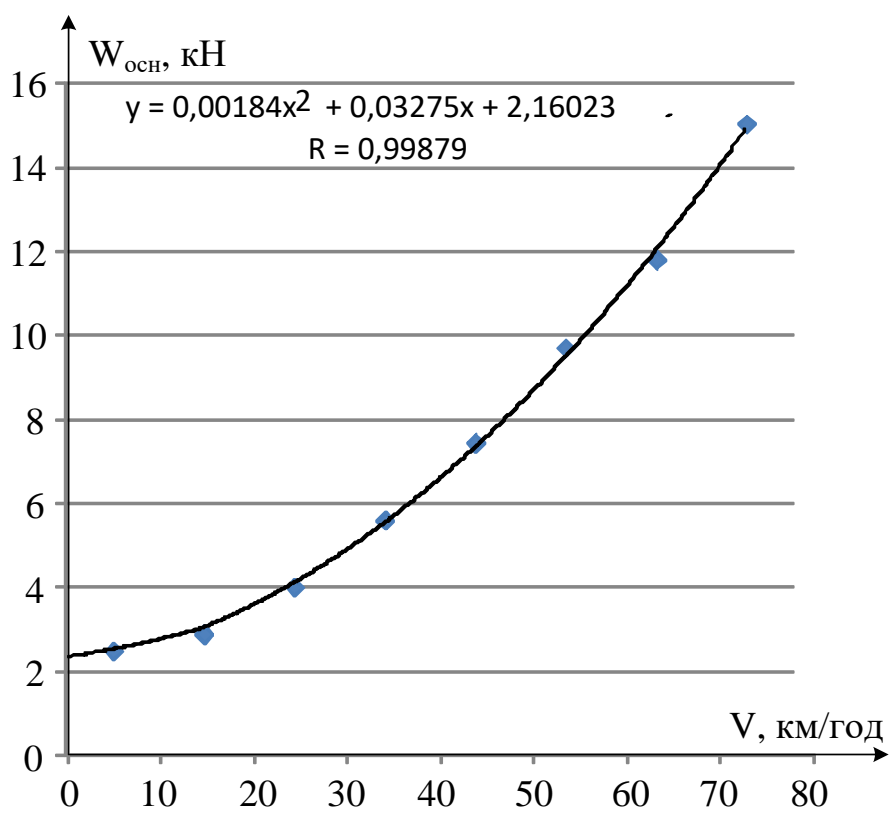


Рис. 3. Характеристика основного опору руху поїзда метрополітену

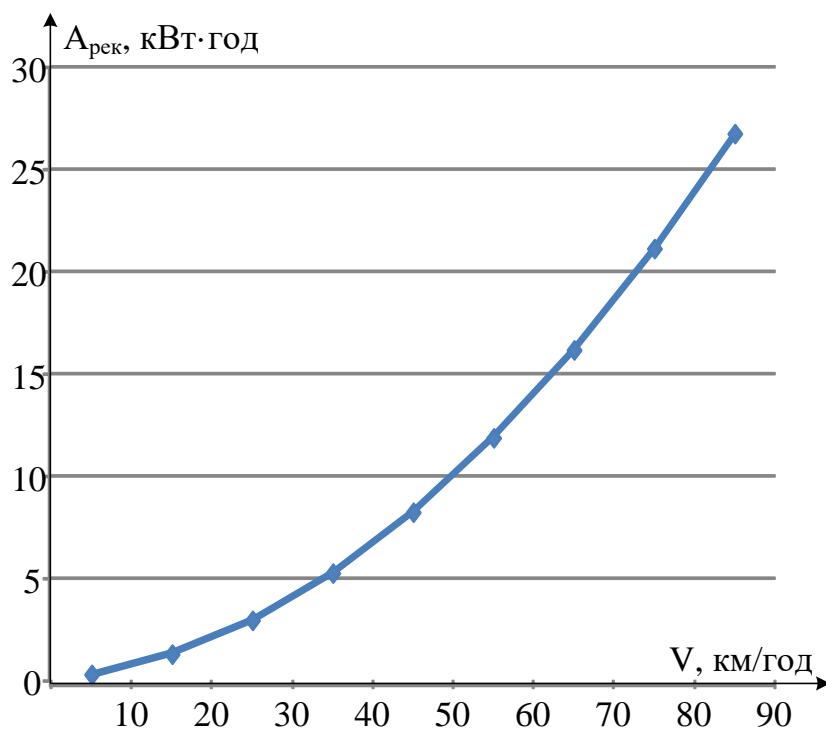


Рис. 4. Графік кількості електроенергії рекуперації поїзда від швидкості руху

Відповідно до технічної документації на обраний рухомий склад [22, 23] обмеження за об'ємом складає 1,5 м³.

Підходи, що передбачають теоретичні методи досліджень, переважно реалізуються через проведення аналітичних розрахунків, побудову діаграм, графіків і залежностей. Деякі з теоретичних досліджень передбачають моделювання реальних типових штатних умов експлуатації електрорухомого складу за допомогою спеціалізованих комп'ютерних моделей. Більш детально принцип визначення параметрів бортових СНЕ за теоретичними методами досліджень описано у вищезазначених роботах. Масиви даних, отримані в процесі комп'ютерного моделювання, у подальшому піддаються математичній обробці.

Підходи, що передбачають застосування експериментально-розрахункових досліджень, реалізовано з використанням дослідного комплексу, до складу якого входить вищезазначений поїзд

і вимірювальна система, встановлена на його борту (рис. 5).

На блок-схемі (рис. 5) прийнято такі позначення силової частини поїзда: комплектація 3М+2Т, автоматичний вимикач (АВ), струмоприймач (СП), блок власних потреб (БВП), асинхронний тяговий двигун (АТД), статичний тяговий перетворювач (СТП), блок резисторів (БР), головний вимикач (ГВ), швидкодіючий вимикач (ШВ). Вимірювальна система розроблена спеціалістами науково-дослідної групи електричного та тягово-енергетичного обладнання Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (ДП «УкрНДІВ») для дослідження енергетичних процесів між контактною мережею та поїздом у реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи входять персональний комп'ютер (ПК), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), блок комутації (БК), блок узгодження (БУ) і вимірювальні датчики (ДС1-ДС11, ДН1-ДН5, ДШ). Вимірювальна

система передбачає отримання, відображення та збереження даних,

отриманих від вимірювальних датчиків, встановлених на дослідному поїзді.

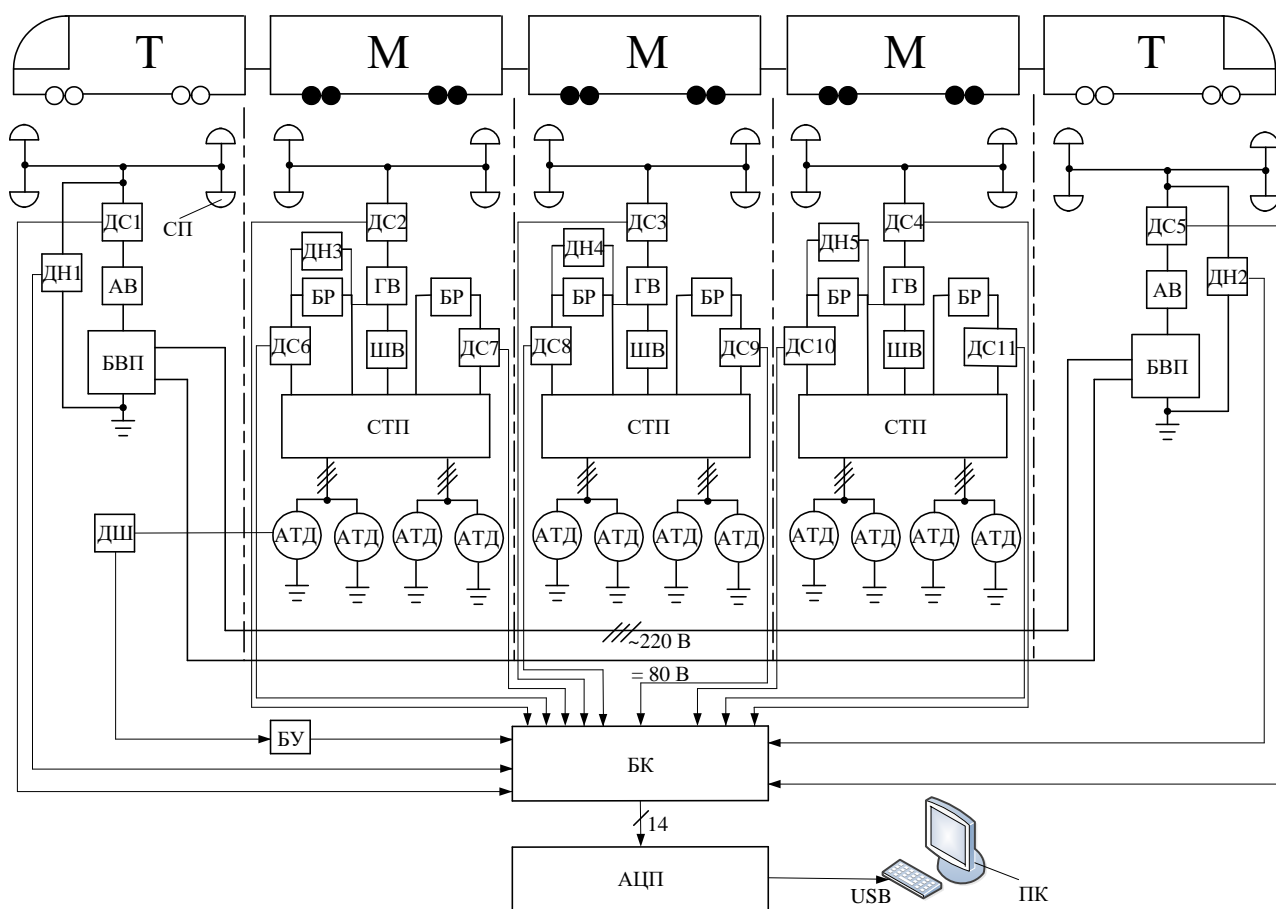


Рис. 5. Блок-схема експериментального випробувального комплексу

Більш детально принципи визначення параметрів бортових ЄНЕ, отриманих експериментально-розрахунковим шляхом, розглянуто у вищенаведених роботах.

Для штатних типових умов експлуатації поїзда під час його різного завантаження виконано дослідження енергетичних процесів. Прийнято, що поїзд експлуатується так:

- у робочі дні (5 днів на тиждень) три та два повних кола з дотриманням «непікового» графіка руху відповідно при номінальному та максимальному завантаженні; одне та два повних кола з дотриманням «пікового» графіка руху відповідно при номінальному та

максимальному завантаженні; одне повне коло з дотриманням «непікового» графіка руху при мінімальному завантаженні;

- у вихідні дні (2 дні на тиждень) два, сім та одне повних кола з дотриманням «непікового» графіка руху відповідно при мінімальному, номінальному та максимальному завантаженні.

- за рік поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

За результатами цих досліджень з використанням вимірювальної системи зафіксовано з частотою дискретизації 2,5 кГц напругу на струмоприймачі $u(t)$, струм поїзда в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; напругу

на гальмівних резисторах $u_R(t)$, струм на гальмівних резисторах $i_R(t)$, швидкість руху поїзда $v(t)$. У подальшому отримані масиви даних піддавались обробці.

За результатами обробки масивів даних (осцилограм), отриманих експериментальним шляхом на заданій ділянці, визначено такі показники: середнє значення напруги контактної мережі в режимах тяги і рекуперативного гальмування ($U_{\text{сер.тяги}}$, $U_{\text{сер.рек}}$); середнє значення струму в режимах тяги поїзда ($I_{\text{сер.тяги}}$); середнє значення струму, що генерується поїздом до контактної мережі під час рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.рек}}$); середнє значення напруги на гальмівних резисторах ($U_{\text{сер.R}}$); середнє значення струму, що розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах у режимі рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.R}}$); час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ($t_{\text{тяги}}$, $t_{\text{рек.}}$), швидкість початку гальмування ($V_{\text{гал}}$), а також середня експлуатаційна швидкість на перегоні ($V_{\text{сер.екс}}$).

За визначеними значеннями величин в процесі обробки масивів даних розраховано такі енергетичні показники: кількість спожитої електроенергії в режимах тяги ($A_{\text{тяги}}$); кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування до контактної мережі ($A_{\text{рек}}$); кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (A_R); середнє та максимальнє значення потужності в режимах рекуперативного гальмування ($P_{\text{сер}}$, P_{max}).

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховано за формулою [24, 25]

$$A_{\text{тяги}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (1)$$

Кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі, розраховується за формулою [26]

$$A_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек.}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (2)$$

Кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (надлишкова енергія), розраховується за формулою [25, 26]

$$A_R = \frac{U_{\text{сер.R}} \cdot I_{\text{сер.R}} \cdot t_{\text{рек.}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3)$$

Середня потужність електроенергії рекуперативного гальмування визначається за виразом [11]

$$P_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N P_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k, \quad (4)$$

де N – загальна кількість інтервалів дискретизації в процесі досліджень;

U_k , I_k – значення напруги і струму в момент часу t_k при дискретизації сигналів $u(t)$ та $i(t)$.

Максимальнє значення потужності електроенергії рекуперативного гальмування визначається за результатом аналізу осцилограм $u(t)$ та $i(t)$ з урахуванням прийнятої частоти дискретизації запису цих сигналів. Визначення максимального значення потужності електроенергії рекуперативного гальмування можна описати математичним виразом [18]

$$P_{\text{max}} = \begin{pmatrix} P_{k1} \\ P_{k2} \\ \dots \\ P_{kN} \end{pmatrix} \rightarrow \max. \quad (5)$$

За результатами обробки масивів даних (осцилограм), отриманих при виконанні теоретичних досліджень (комп'ютерного моделювання), розраховано такі показники: кількість

спожитої електроенергії в режимах тяги ($A_{\text{тяги}}$); кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування ($A_{\text{рек}} + A_{\text{R}}$); середнє та максимальнє значення потужності в режимах рекуперативного гальмування ($P_{\text{сер}}$, P_{max}).

Для кожного з розглянутих підходів визначено такі показники: значення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ, термін окупності, маса і об'єм обраної системи накопичення, кількість заощадженої електроенергії, відношення маси системи накопичення до маси поїзда в порожньому та максимально завантаженому стані, прискорення поїзда під час розгону з урахуванням розміщення системи накопичення на борту, погіршення динамічних показників поїзда під час розгону.

Значення потужності ($P_{\text{ЄНЕ}}$) та енергоємності ($A_{\text{ЄНЕ}}$) бортового ЄНЕ розраховуються на основі вищезрозглянутих підходів. Термін окупності ($T_{\text{ок}}$), масу ($m_{\text{ЄНЕ}}$), об'єм ($V_{\text{ЄНЕ}}$) обраної системи накопичення розраховано з урахування того, що система накопичення складається з бортового ЄНЕ, реверсивного силового перетворювача, системи керування енергообмінними процесами, метало-конструкції, елементів системи вентиляції, датчиків струму та напруги [18, 19]. Під час досліджень прийнято, що бортовий ЄНЕ зібраний з конденсаторних модулів типу ЕК404 виробництва ЗАТ «ЕЛТОН». Термін окупності системи накопичення визначається за виразом [18]

$$T_{\text{ок}} = \frac{Q_{\text{ЄНЕ}}}{T_e \cdot E_r}, \quad (6)$$

де Q – вартість системи накопичення, грн;
 T_e – тариф на електроенергію, грн/кВт·год;
 E_r – кількість заощадженої електроенергії за рік за рахунок впровадження системи накопичення, кВт·год.

При цьому $T_e = 3,42$ грн/кВт·год.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначається за формулою [18]

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}, \quad (7)$$

де l_1 , l_2 – кількість робочих і вихідних днів на рік;

E_{d1} , E_{d2} – кількість заощадженої електроенергії в робочий і вихідний дні відповідно, кВт·год.

Маса та об'єм системи накопичення розраховувались з урахуванням того, що необхіднє значення робочої напруги, потужності та енергоємності формувались шляхом послідовно-паралельного з'єднання зазначених конденсаторних модулів. Під час досліджень з оцінювання кількості заощадженої електроенергії прийнято, що коефіцієнт використання електроенергії за цикл «заряджання–накопичення–розряджання» складає 0,86.

Кількість заощадженої електроенергії розраховується за формулою [18]

$$\alpha = \frac{E_r}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (8)$$

де $A_{\text{тяги(рік)}}$ – кількість спожитої електроенергії з контактної мережі за рік, кВт·год.

Відношення маси системи накопичення до маси поїзда в порожньому та максимально завантаженому стані визначається за формулою

$$m_o = \frac{m_{\text{ЄНЕ}}}{m_1(m_2)} \cdot 100, \quad (9)$$

де $m_{\text{ЄНЕ}}$ – маса системи накопичення, т;

m_1 – маса поїзда в порожньому стані, т;

m_2 – маса поїзда в максимально завантаженому стані, т.

Прискорення поїзда під час розгону з урахуванням розміщення системи накопичення на борту визначається за формулою

$$a_{\text{СНЕ}} = \frac{F_{\text{ТЯГИ}} - W_{\text{ОСН}}}{(m_3 + m_{\text{СНЕ}})(1 + \gamma)}, \quad (10)$$

де $F_{\text{ТЯГИ}}$ – пускова сила тяги, кН;

$W_{\text{ОСН}}$ – основний опір руху, кН;

m_3 – маса поїзда під час номінального завантаження, т;

$(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас.

Погіршення динамічних показників поїзда під час розгону визначається за формулою

$$a_o = \frac{(a_{\text{П}} - a_{\text{СНЕ}})}{a_{\text{П}}} \cdot 100, \quad (11)$$

де $a_{\text{П}}$ – пускове прискорення поїзда без розміщення системи накопичення на борту, м/с².

Результати досліджень зазначених показників для обраних систем накопичення за різними підходами, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати досліджень при застосуванні різних підходів

Підхід	Параметр дослідження							
	Потужність бортового СНЕ, МВт	Енергоємність бортового СНЕ, кВт·год	Термін окупності системи накопичення, роки*	Маса системи накопичення, т	Об'єм системи накопичення, м ³	Кількість заощадженої електроенергії, %	Відношення маси системи накопичення до маси поїзда, %	Прискорення поїзда під час розгону, м/с ² /погіршення динамічних показників поїзда, %**
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перший підхід	3,88	45,09	> 50	56,5	50,4	34,7	21,6–33,7	1,00***/19,4
Другий підхід (I)	3,9	26,7	> 30	34,6	31,0	32,7	13,2–23,1	1,08***/12,9
Другий підхід (II)	3,08	8,0	8,5	9,6	8,6	27,4	3,7–6,4	1,19***/4,0
Третій підхід	1,5	3,5	4,6	4,7	4,2	19,6	1,8–3,1	1,21***/2,4
Четвертий підхід	3,88	4,84	7,1	6,3	5,6	23,0	2,4–4,2	1,2***/3,2
П'ятий підхід****	–	–	–	–	–	–	–	–
Шостий підхід	1,02	5,02	5,6	5,1	4,5	20,3	1,9–3,4	1,21***/2,4
Сьомий підхід	1,0	3,0	5,2	3,1	2,8	16,1	1,2–2,1	1,22***/1,6

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Восьмий підхід	1,0	3,0	5,2	3,1	2,8	16,1	1,2–2,1	1,22***/1,6
Дев'ятий підхід	0,8	1,7	3,2	1,6	1,4	11,4	0,6–1,1	1,23***/0,8
Десятий підхід	0,8	1,7	3,2	1,6	1,4	12,0	0,6–1,1	1,23***/0,8

Примітки: *Вартість систем накопичення в розрахунках прийнято з урахуванням курсу іноземної валюти станом на 25.01.2022 р.

**Показники погіршення динаміки руху поїзда та прискорення під час його розгону визначаються за умови незмінного значення пускової сили тяги без та з розміщенням бортового ЄНЕ на поїзді.

*** Значення прискорення поїзда під час розгону розраховано для номінального завантаження. Нормативне значення цього показника має бути не менше $1,2 \text{ м/с}^2$ [27].

**** П'ятий підхід має обмежену сферу застосування і його неможливо застосувати для визначення параметрів бортового ЄНЕ на електрорухомому складі з асинхронним тяговим приводом.

Результати порівняльного аналізу підходів (табл. 1) і досліджень параметрів систем накопичення за умов застосування цих підходів (табл. 3) дозволив встановити таке:

– перший і другий (I) підходи засновані на використанні бортового ЄНЕ значної потужності та енергоємності, здатного накопичувати повний об'єм електроенергії рекуперації поїзда. При цьому термін окупності систем накопичення за цими підходами складає понад 30 років, маса – понад 34 т, об'єм – понад 30 м^3 . Ці системи також мають значний вплив на динаміку розгону поїзда, тому потрібне використання більш потужного тягового електропривода для виконання нормативних вимог за прискоренням ($\geq 1,2 \text{ м/с}^2$) [27], що призведе до додаткового збільшення терміну окупності такого поїзда. Системи накопичення з зазначеними параметрами можна розмістити тільки на окремому вагоні поїзда. Як наслідок, системи накопичення з визначеними параметрами за зазначеними підходами недоцільно розміщувати на поїзді за терміном окупності та масогабаритними показниками;

– другий підхід (II) є простим у застосуванні, універсальним, потребує середніх фінансових витрат, не враховує

деяких реальних умов експлуатації, техніко-економічну складову та обмеження за масогабаритними показниками. Для заданих умов експлуатації поїзда при застосуванні цього підходу термін окупності для цієї системи складає близько 9 років, маса – 9,6 т, об'єм – $8,6 \text{ м}^3$. Ця система порівняно з попередніми має значно менші показники терміну окупності та масогабаритні показники, проте значення цих показників є значними. При використанні такої системи на поїзді не будуть виконуватись нормативні вимоги за прискоренням під час розгону поїзда. Отже, розміщення цієї системи накопичення є недоцільним за декількома важливими показниками;

– третій, четвертий, шостий підходи засновані на визначенні параметрів за теоретичними та експериментально-розрахунковими методами досліджень. Третій підхід заснований на визначенні параметрів шляхом застосування основних положень електричної тяги та чисельних методів інтегрування за умов обмеження струму споживання з контактної мережі; четвертий – на використанні основних положень теорії імовірності за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування; шостий – на використанні методів математичного

моделювання за середніми значеннями потужності та енергоємності. Для заданих умов експлуатації поїзда залежно від застосування того чи іншого підходу термін окупності для цих систем складає від 4,6 до 7,1 року, маса – від 4,7 до 6,3 т, об'єм – від 4,2 до 5,6 м³. Отже, термін окупності цих систем накопичення доволі незначний, а для системи накопичення, визначеної за третім підходом, навіть складає менше 5 років. Масогабаритні показники цих систем задовольняють нормативні вимоги за прискоренням під час розгону поїзда, тому їхній вплив на динаміку розгону незначний. Загальним недоліком цих підходів є те, що вони не враховують техніко-економічну складову та обмеження за масогабаритними показниками для систем накопичення. У цілому використання систем накопичення з параметрами, визначених за третім, четвертим або шостим підходами, є цілком можливим, оскільки термін окупності цих систем порівняно незначний і їхній вплив на динаміку розгону поїзда задовольняє нормативні вимоги;

– п'ятий підхід заснований на використанні чисельних розрахунків з використанням теоретичних основ електричної тяги та електротехніки. Цей підхід має обмеження у сфері застосування, передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ тільки для тягових одиниць з двигунами постійного струму послідовного збудження, не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення. Тому визначення параметрів бортового ЄНЕ в цьому випадку для поїзда з асинхронним тяговим приводом не було можливим;

– сьомий, восьмий, дев'ятий, десятий підходи дозволяють визначати раціональні параметри систем накопичення за одним або відразу декількома критеріями оцінювання. Сьомий підхід передбачає визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення.

Восьмий і дев'ятий підходи передбачають визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ за двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Десятий підхід передбачає визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ за трьома важливими критеріями – обмеженням за масою, об'ємом і мінімальним терміном окупності системи накопичення. Для заданих умов експлуатації поїзда залежно від застосування того чи іншого підходу термін окупності для цих систем складає від 3,2 до 5,2 року, маса – від 1,6 до 3,1 т, об'єм – від 1,4 до 2,8 м³. Отже, термін окупності цих систем мінімальний, їхні масогабаритні показники мінімальні порівняно з попередніми системами, що дозволяє мінімально впливати на динаміку розгону поїзда. Головна перевага цих підходів – можливість визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ за одним або декількома критеріями оцінювання. Отже, найбільш доцільним як з технічної, так і економічної точки зору є розміщення систем накопичення, визначених за цими підходами. Особливий інтерес має визначення параметрів за десятим підходом, оскільки він дозволяє обґрунтувати раціональний вибір системи накопичення відразу за трьома важливими критеріями (мінімальною вартістю, обмеженням за масою і об'ємом).

Висновки. Узагальнений порівняльний аналіз існуючих підходів на підставі проведених досліджень дозволив встановити таке:

– найбільш простими є підходи, за яких застосовується потужний та енергоємний накопичувач, здатний зберігати і повторно використовувати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування електродвигуна під час заданих умов його експлуатації. Основним факторами, що стримують впровадження таких технічних

рішень, є вартісні та масогабаритні показники систем накопичення;

– з техніко-економічної точки зору, а також з урахування технологічних можливостей сьогодення на електрорухомому складі доцільним є застосування бортового ЄНЕ незначної потужності та енергоємності;

– існують підходи, що дозволяють швидко отримати результат щодо визначення параметрів бортових ЄНЕ та не потребують проведення складних і тривалих досліджень, однак вони не дозволяють урахувати різні фактори реальних умов експлуатації електрорухомого складу;

– підходи, засновані на використанні даних експериментальних досліджень, потребують значних фінансових ресурсів і часу, проте вони дозволяють враховувати реальні умови експлуатації електрорухомого складу;

– наразі найбільшого розвитку отримали підходи, у яких здійснюється вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ з використанням теоретичних

досліджень за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм. Ці програми дозволяють з достатньою точністю відтворювати процеси реальної експлуатації рухомого складу і значно зекономити фінансові ресурси та зменшити витрати часу на проведення таких досліджень;

– найбільш доцільним є визначення параметрів бортового ЄНЕ за багатокритеріальним підходом, оскільки він має ряд переваг порівняно з іншими та дозволяє обґрунтувати вибір раціональних параметрів за трьома важливими критеріями оцінювання – обмеженням за масою і об'ємом, а також мінімальним терміном окупності системи накопичення.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу за рахунок розвитку теорії визначення параметрів бортового ЄНЕ та будуть корисними напрацюваннями під час створення інноваційного електрорухомого складу.

Список використаних джерел

1. Патент RU 2436690C2 Российская Федерация, МПК В60L 7/12 Способ движения электрического транспортного средства на рекуперированной электроэнергии и устройство для его осуществления // Лиманский С. С.: заявитель и патентообладатель Лиманский С. С. № 2010104636/11; заяв. 11.02.2010; опубл. 20.12.11. Бюл. № 35. 18 с.
2. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. *TTS Technika Transportu szynowego*. 2018. № 10. P. 39–43.
3. Рыбалко А. Я., Дыбрин С. В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 8. С. 356–361.
4. Сулим А. О., Хозя П. О., Мельник О. О. Застосування бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля*. 2020. № 4(260). С. 87–92. doi: 10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92.
5. Васильев В. А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Васильев Виталий Алексеевич; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. СПб., 2012. 16 с.

6. Шевлюгин М. В., Желтов К. С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. *НТТ – Наука и техника транспорта*. 2008. № 1. С. 15–20.
7. Щуров Н. И., Щеглов К. В., Штанг А. А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги. *Сборник научных трудов НГТУ*. Новосибирск, 2008. № 1(51). С. 99–104.
8. Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *ET Electr. Syst. Transp.* 2014. Vol. 4. № 1. P. 9–20.
9. Жемеров Г. Г., Ильина Н. А., Тугай Д. В., Холод О. И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків: НТУ «ХП», 2013. № 1. С. 41–49.
10. Рябов Е. С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків: НТУ «ХП», 2015. № 6 (1115). С. 132–137.
11. Костин Н. А., Никитенко А. В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. *Залізничний транспорт України*. 2014. № 3. С. 15–23.
12. Sulym, A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of On-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU. Dnipro*, 2018. Is. 5. P. 79–87. URL: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
13. Муха А. М., Костін М. О., Куриленко О. Я., Ципля Г. В. Підвищення ефективності роботи електроприводу постійного струму на основі використання суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. 2017. № 5 (71). С. 48–60. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>.
14. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. *International journal of renewable energy research*. 2019. Vol. 9. No. 2 P. 848–858.
15. Szênâsy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Acta Technica Jaurinensis*. 2009. Vol. 2. № 1. P. 117–131.
16. Мятёж А. В., Ярославцев М. В. Определение энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. *Транспорт Российской Федерации. Электроснабжение и электротехника*. 2013. № 4 (47). С. 62–65.
17. Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Is. 2 (92). P. 63–71. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
18. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Is. 3 (102). P. 28–38. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>.
19. Сулим А. О., Хозя П. О. Удосконалення методології визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для поїзда метрополітену. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп.* 2020. № 5(89). С. 45–67. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218603>.
20. Radu P. V., Szelag A., Steczek M. On-board energy storage devices with supercapacitors for metro trains – case study analysis of application effectiveness. *Energies*. 2019. Vol. 12 (7). 1291. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.3390/en12071291>.

21. Сулим А. О. Багатокритеріальний підхід до обґрунтування вибору раціональних параметрів ємнісного накопичувача для поїзда метрополітену. *International scientific conference «New development areas of digitalization at the beginning the third millennium»*, December 10-11, 2021. Riga, Republic of Latvia, 2021. P. 50-54. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-13>.

22. Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метро, виготовлених в рамках комплексної модернізації для Комунального підприємства «Київський метрополітен». Випробування електрообладнання, випробування на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку, тягово-енергетичні випробування, випробування системи автоматичного регулювання швидкості, випробування з визначення параметрів мікроклімату в кабіні управління та рівнів шуму й інфразвуку вагонів метро / ДП «УкрНДІВ» ; керівник Хозя П. О.; викон. Донченко А. В., Речкалов С. Д., Шмаков С. В. [та ін.]. Кременчук, 2014. 154 с. ДР 0114U006350. Інв. № 1501.

23. ТУ У 30.2-05763814-111:2014. Вагони метрополітену моделей 81-7080 та 81-7081. Комплексна модернізація з впровадженням асинхронного тягового приводу. Технічні умови. Київ, 2014. 95 с.

24. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. Москва: Транспорт, 1995. 294 с.

25. Слепцов М. А., Долаберидзе Г. П., Прокопович А. В. Основы электрического транспорта: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.

26. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим та ін. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук, 2015. Вип. 12. С. 48–56.

27. СОУ МПП 45.060-253:2008. Вагони метрополітену. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ: Міністерство промислової політики України, 2008. 29 с.

Сулим Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування». ORCID iD: 0000-0001-8144-8971. Тел.: 096-799-01-58. E-mail: sulim1.ua@gmail.com.

Sulym Andrii Oleksandrovych, PhD (Engineering), senior scientist, Professor, Deputy Director for scientific work, State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute». ORCID iD: 0000-0001-8144-8971. Tel.: 096-799-01-58. E-mail: sulim1.ua@gmail.com.

Статтю прийнято 26.11.2022 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 629.1:621.3.045

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Канд. техн. наук О. В. Губаревич

A COMPREHENSIVE STUDY OF THE INFLUENCE OF DAMAGES OF THE STATOR WINDING OF ASYNCHRONOUS MOTORS DURING OPERATION OF VEHICLES

PhD (Tech.) O. Gubarevych

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273633>



***Анотація.** Ефективність забезпечення транспортних перевезень пов'язана з підвищенням надійності роботи транспортної інфраструктури. Для забезпечення надійної та економічної роботи необхідний розвиток систем функціональної діагностики основних елементів транспортних засобів, що гарантують безперервний контроль технічного стану основних його елементів. Контроль стану асинхронних електродвигунів у складі електроприводів транспортних засобів є важливим сучасним питанням, від вирішення якого залежить надійність роботи всієї транспортної інфраструктури. Найпоширенішим видом пошкодження у двигунах у період експлуатації є міжвиткові замикання у фазі обмотки статора. Міжвиткові замикання складні для виявлення, але за їхньої наявності двигун продовжує працювати з зміною його робочих та електродинамічних показників і характеристик. У статті проведено дослідження впливу міжвиткового замикання різного ступеня на механічні, електричні та енергетичні показники і характеристики двигуна при різних режимах його роботи. При проведенні досліджень використано математичну модель асинхронного двигуна.*

На основі отриманих даних рекомендовано вибір найбільш ефективного струмового методу діагностики міжвиткових замикань при оцінюванні технічного стану та прогнозування безвідмовного періоду роботи асинхронного електродвигуна для використання у складі вбудованих діагностичних систем транспортних засобів.

***Ключові слова:** транспортні технології, асинхронні двигуни, міжвиткові замикання, технічна діагностика, математичне моделювання.*

***Abstract.** The efficiency of providing transportation is related to increasing the reliability of the transportation infrastructure. To ensure reliable and economical operation, it is necessary to develop systems of functional diagnostics of the main elements of vehicles, which provide continuous control of the technical condition of its main elements. Monitoring the state of asynchronous electric motors as part of electric drives of vehicles is an important modern issue, the solution of which depends on the reliability of the entire transport infrastructure. The most common type of damage in motors during operation is an inter-turn short circuit in the stator winding phase. Turn-to-turn closures are difficult to detect, but if they are present, the engine continues to operate with a change in its operating and electrodynamic indicators and characteristics. However, depending on the degree of turn-to-turn closures (the number of closed turns) in the winding phase, the probability and time of an emergency stop of the electric drive increase.*

In this paper, the influence of turn-to-turn closures of varying degrees on mechanical, electrical and energy parameters and engine characteristics under various operating modes has been studied. In the course of the research, a mathematical model of an induction motor was used with the established adequacy of the simulation results and the possibility of creating an asymmetric rotating stator field. The adopted simulation model of an induction motor with a squirrel-cage rotor is written in retarded coordinates.

Also, studies were carried out on the effect of turn-to-turn closures on the ripple coefficient of the electromagnetic torque and the unbalance coefficient of the stator phase currents.

Based on the data obtained, recommendations are given on choosing the most effective method of electric current for diagnosing interturn faults in assessing the technical condition and predicting the failure-free operation of an asynchronous electric motor for use as part of an electric motor under construction. - in diagnostic systems of cars.

Keywords: *transport technologies, induction motors, turn-to-turn closures, technical diagnostics, mathematical modeling.*

Вступ. В умовах пошуку шляхів зниження витрат на виробництво, доставку та реалізацію товарів усе більш актуальними стають питання з транспортної логістики, спрямовані переважно на ефективне вирішення транспортних завдань. Ефективність забезпечення транспортних перевезень пов'язана з підвищенням надійності роботи транспортної інфраструктури. Для забезпечення надійної та економічної роботи необхідний розвиток систем функціональної діагностики основних елементів транспортних засобів, що забезпечують безперервний контроль технічного стану основних його елементів.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є найбільш застосовуваним типом електричних машин у приводах транспортних засобів, що найбільше впливають на роботу транспорту і мають достатній рівень аварійних відмов. На електродвигуни в сучасних транспортних системах і механізмах може діяти комплекс цілого ряду специфічних факторів: різко змінний характер робочих навантажень, вібромеханічні навантаження, у тому числі і від робочих механізмів, підвищені і низькі температури, підвищена вологість та ін. Враховуючи зростаючу відповідність функцій, що виконують електроприводи в транспортних системах, підвищення вимог до якості та точності

завдань, виконуваних електродвигунами, і особливості умов їхньої експлуатації в сучасних транспортних засобах, особливого значення набуває контроль та утримання їхнього справного технічного стану [1-3]. Як свідчить експлуатаційна усереднена статистика ремонтних підприємств, відмови по вузлах асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором поділяються так: відмови обмотки статора – 77,4 %; відмови ротора – 8,4 %; відмови підшипникових вузлів – 14,2 % [4, 5]. Значна частка (43,4 %) відмов обмотки статора припадає на міжвиткові замикання у фазі обмотки двигуна. Міжвиткові замикання є складним для виявлення пошкодженням двигуна, при якому він продовжує працювати зі зміною його робочих та електродинамічних показників і характеристик [6]. Однак залежно від ступеня міжвиткового замкнення (кількості замкнених витків) у фазі обмотки час безаварійної роботи двигуна буде різним [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Міжвиткові замкнення у фазі обмотки статора асинхронних двигунів є найбільш поширеним видом дефектів і причиною відмов електричних машин. Завчасне визначення наявності таких дефектів під час роботи – це важливий фактор надійної роботи двигунів, подовження їхнього

ресурсу та запобігання зупинці аварійного характеру. Крім того, точне встановлення ступеня міжвиткового замкнення дозволяє прогнозувати час безвідмовної роботи обладнання, що також є важливим сучасним питанням при експлуатації електромеханічного устаткування [8].

Проблемі діагностування та виявлення міжвиткових замикань приділяється велика увага з боку вчених і спеціалістів-дослідників. Так, у роботі [9] подано методи, засновані на передових технологіях обробки сигналів з оцінювання спектральної щільності потужності, і частотно-часові для виявлення міжвиткових коротких замикань у статорі асинхронних машин. Автори в роботах [10, 11] для виявлення міжвиткових замикань розглядають методологію моніторингу стану двигуна, засновану на тепловому аналізі. У роботах [12-14] методам аналізу вібрації приділяється особлива увага як широко використовуваним методам через можливість виявлення високої ймовірності відмов. У цих роботах подано розроблення моделей з класифікуючим алгоритмом для отримання показань вібрації від електродвигунів і визначення того, чи має машина несправну поведінку, і якщо так, то яка саме несправність. Однак, щоб алгоритм міг визначити тип відмови, для моделей необхідно розробити набір даних із показниками кількох двигунів у різних умовах відмови. Це не зовсім зручно для використання в умовах експлуатації.

Враховуючи, що електродвигуни за наявності міжвиткового замикання продовжують експлуатуватися, проведення досліджень з впливу та прояву міжвиткового замкнення різного ступеня на робочі та електродинамічні характеристики і показники двигуна є актуальним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є проведення досліджень з впливу міжвиткових замикань на характеристики асинхронного електродвигуна, що експлуатується, із

використанням імітаційного моделювання та пропозиції щодо визначення діагностичних проявів пошкоджень обмотки статора методами функціональної діагностики.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- вибрати математичну модель асинхронного двигуна зі встановленим рівнем адекватності, здатну реалізовувати різний ступень замкнення витків в обмотці статора;

- провести дослідження впливу ступеня міжвиткового замкнення на одній з обмоток статора двигуна з використанням математичної моделі;

- провести аналіз для досліджених параметрів і характеристик про вплив ступеня міжвиткового замикання на динаміку їхньої зміни;

- визначити напрям розвитку методів функціональної діагностики транспортного обладнання для виявлення міжвиткового замкнення при створенні вбудованої діагностичної системи.

Основна частина дослідження.

Природою міжвиткового замкнення є пробій твердого діелектрика внаслідок порушення електричної міцності та втрачання своїх ізоляційних властивостей ізоляції обмотки двигуна [5]. Міжвитковим замкненням в електричній машині вважається коротке замикання між різними витками однієї котушки або секції обмотки двигуна. До найпоширенішої причини виникнення цього пошкодження при експлуатації транспортного обладнання належить тривале перевантаження двигуна, що може виникнути через нештатний режим експлуатації обладнання, яке приводиться в дію цим двигуном, або при виході з ладу механічних деталей, наприклад заклинювання підшипника, несправності в редукторі або іншому механізмі. У результаті цього по обмотках протікає підвищений струм, що призводить до перегріву проводів і руйнування ізоляції в пошкоджених раніше місцях. Внаслідок цього відбувається коротке замикання між

витками обмотки. Крім експлуатаційних, ще існують технологічні причини пробою ізоляції внаслідок порушення технологічного процесу виготовлення обмотки або при її укладанні в пази при виробленні або ремонті двигуна [5]. Підвищена вологість обмотки при порушенні ступеня захисту від впливу

навколишнього середовища двигуна в період його експлуатації або зберігання також сприяє міжвитковому замиканню в обмотці фази двигуна.

Для проведення досліджень обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії АІР132М4, основні паспортні параметри якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Паспортні параметри асинхронного двигуна АІР 132М4

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Номінальна потужність	P_n	кВт	11,0
Номінальна фазна напруга	U_n	В	220
Частота напруги живлення	f	Гц	50
Частота обертання в режимі холостого ходу	n_{xx}	об/хв	1498
Момент холостого ходу	M_{xx}	$\text{Н}\cdot\text{м}$	0,38
Активний опір обмотки статора	r_1	Ом	0,5
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора	r'_2	Ом	0,36
Реактивний опір обмотки статора	x_1	Ом	0,56
Кількість витків фази статора	w	–	96
Середня довжина витка обмотки	$l_{сер1}$	м	0,706
Частота обертання в номінальному режимі	n_n	об/хв	1450
Номінальний момент двигуна	M_n	$\text{Н}\cdot\text{м}$	72,671
Момент інерції двигуна	J	$\text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,04

При виборі математичної моделі для проведення досліджень міжвиткових замикань у фазі обмотки статора асинхронного двигуна необхідно враховувати можливість створення в ній несиметричного обертального поля, що відбувається при міжвитковому замиканні різного ступеня (різної кількості витків).

Для проведення досліджень обрано імітаційна модель асинхронного двигуна, що виконана в програмному середовищі

MATLab, принципи побудови якої наведені в роботах [15, 16]. Вибір моделі обумовлений встановленим рівнем її адекватності в різних режимах роботи [17].

Прийнята імітаційна модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором записана в «загальмованих координатах».

Як відомо, при виникненні міжвиткових замикань в обмотці статора порушується симетричність обертального

магнітного поля статора. Для реалізації імітації режиму роботи асинхронного двигуна з несиметричними обмотками в моделі задається зміна активного опору обмотки та індуктивність розсіювання.

Для передбачення зміни взаємної індуктивності обмоток визначається, який саме вплив має зміна комплексного опору однієї обмотки (декількох обмоток) на індуктивність магнітного ланцюга. Тобто встановлюється, на скільки відрізняються дійсні значення зазначених параметрів від номінальних значень. Після цього враховуються в запропонованій моделі зміни взаємної індуктивності обмоток при проведенні моделювання [16].

Отже, реалізація міжвиткового замикання на моделі виконана зниженням комплексного опору фазної обмотки статора, що імітує замкнення витків у відсотковому відношенні від загальної кількості у фазі непошкодженої обмотки з урахуванням зміни взаємоіндуктивності обмоток.

Дослідження впливу міжвиткового замкнення на механічні та робочі характеристики двигуна. Дослідження впливу міжвиткового замкнення різного ступеня в обмотці фази асинхронного двигуна на механічні та робочі характеристики проведено для таких випадків: 100 % – статор не має пошкоджень, 90 % – відповідає замиканню 10 % витків обмотки фази, 80 % – замиканню 20 % витків обмотки фази їхньої загальної кількості. Для імітації міжвиткового замикання в математичній моделі спочатку на 10 %, потім 20 % витків зменшувався комплексний опір обмотки статора. Моделювання проводилося з перерахуванням параметрів до фіксованої швидкості частоти обертання двигуна для 100, 90 та 80 % відносного комплексного опору статора z [18]. Результати моделювання вказаних процесів на імітаційній моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведено в табл. 2-4.

Таблиця 2

Результати моделювання залежності моменту двигуна (M), корисної потужності (P_2), відносного значення корисної потужності (P_2^*), повної споживаної потужності (S) від частоти обертання двигуна (n)

n , об/хв	M , Н·м			P_2 , кВт			$P_2^* = \frac{P_2}{P_{2ном}}$, в.о.			S , кВА		
	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %
1425,7	101,819	102,354	103,964	15,19	15,28	15,52	1,381	1,389	1,411	19,63	20,07	20,921
1440,8	84,072	84,419	85,779	12,68	12,73	12,84	1,153	1,157	1,176	16,507	16,76	17,575
1450,0	72,443	72,695	73,989	11,0	11,03	11,23	1,0	1,003	1,021	14,24	14,573	15,263
1470,8	43,933	44,022	44,13	6,76	6,775	6,793	0,615	0,616	0,618	9,885	10,12	10,493
1485,8	21,518	21,541	21,569	3,342	3,346	3,351	0,304	0,304	0,305	7,257	7,478	7,847
1488,3	17,64	17,654	18,607	2,743	2,746	2,92	0,249	0,25	0,265	6,885	7,128	7,582
1490,8	14,747	13,731	14,27	2,136	2,138	2,14	0,194	0,194	0,195	6,614	6,864	7,183
1493,3	9,765	9,77	9,777	1,521	1,522	1,523	0,138	0,138	0,138	6,449	6,656	6,88
1494,8	7,506	7,376	7,4069	1,175	1,149	1,15	0,107	0,104	0,105	6,351	6,56	6,788
1496,4	4,805	4,807	5,4343	0,747	0,747	0,748	0,068	0,068	0,068	6,273	6,485	6,715
1497,3	2,385	2,386	2,387	0,368	0,368	0,369	0,033	0,033	0,034	6,227	6,44	6,671
1498,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,204	6,42	6,652

Таблиця 3

Результати моделювання залежності реактивної потужності (Q_1), активної потужності (P_1) і відносного значення активної потужності (P_1^*) від частоти обертання двигуна (n)

$n, \text{об/хв}$	$Q_1, \text{кВАр}$			$P_1, \text{кВт}$			$P_1^* = \frac{P_1}{P_{1н}}, \text{в.о.}$		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%	100%	90%	80%
1425,7	9,35	9,808	10,813	17,26	17,51	17,91	1,404	1,425	1,457
1440,8	8,255	9,525	9,494	14,3	14,43	14,79	1,151	1,174	1,203
1450,0	7,193	7,574	8,298	12,29	12,45	12,81	1,0	1,013	1,042
1470,8	6,613	6,751	7,174	7,347	7,539	7,657	0,598	0,613	0,623
1485,8	6,235	6,399	6,768	3,713	3,87	3,971	0,302	0,315	0,323
1488,3	6,172	6,359	6,727	3,051	3,22	3,498	0,248	0,262	0,285
1490,8	6,15	6,377	6,682	2,433	2,539	2,635	0,198	0,207	0,214
1493,3	6,202	6,382	6,581	1,767	1,89	2,007	0,144	0,154	0,163
1494,8	6,188	6,39	6,597	1,43	1,483	1,598	0,116	0,121	0,113
1496,4	6,194	6,401	6,618	0,995	1,042	1,138	0,081	0,085	0,093
1497,3	6,197	6,405	6,627	0,614	0,673	0,764	0,05	0,055	0,062
1498,0	6,203	6,416	6,645	0,175	0,225	0,304	0,014	0,018	0,025

Таблиця 4

Результати моделювання залежності середнього струму статора ($I_{1ср}$), відносного значення середнього струму статора ($I_{1ср}^*$), коефіцієнта корисної дії (η), коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) від частоти обертання двигуна (n)

$n, \text{об/хв}$	$I_{1ср}, A$			$I_{1ср}^* = \frac{I_{1ср}}{I_{1н}}, \text{в.о.}$			$\eta, \text{в.о.}$			$\cos\phi, \text{в.о.}$		
	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %
1425,7	29,742	30,409	31,698	1,378	1,409	1,469	0,88	0,873	0,867	0,879	0,872	0,856
1440,8	24,742	25,394	26,629	1,147	1,177	1,234	0,887	0,882	0,874	0,866	0,861	0,842
1450,0	21,576	22,08	23,126	1,0	1,023	1,072	0,895	0,886	0,876	0,863	0,854	0,839
1470,8	14,977	15,333	15,898	0,694	0,711	0,737	0,92	0,899	0,887	0,743	0,745	0,72
1485,8	10,995	11,33	11,889	0,51	0,525	0,551	0,9	0,865	0,859	0,512	0,518	0,506
1488,3	10,432	10,8	11,488	0,483	0,501	0,532	0,899	0,853	0,846	0,443	0,452	0,461
1490,8	10,021	10,4	10,883	0,464	0,482	0,504	0,878	0,842	0,81	0,368	0,37	0,367
1493,3	9,771	10,085	10,424	0,453	0,467	0,483	0,861	0,805	0,759	0,274	0,284	0,292
1494,8	9,623	9,939	10,285	0,446	0,461	0,477	0,822	0,775	0,72	0,225	0,226	0,235
1496,4	9,505	9,826	10,174	0,441	1,409	0,472	0,751	0,717	0,647	0,159	0,161	0,169
1497,3	9,435	9,758	10,108	0,437	1,177	0,468	0,599	0,537	0,483	0,099	0,105	0,115
1498,0	9,403	9,728	10,079	0,436	1,023	0,467	0	0	0	0,028	0,035	0,046

За результатами моделювання, наведеними в табл. 2, побудовано механічні характеристики двигуна $n=f(M)$ для замкнення різної кількості витків обмотки

статора у відсотковому відношенні (рис. 1). За результатами табл. 2-4 побудовано графіки залежності повної потужності, що споживається з мережі (рис. 2) $S=f(P_2^*)$,

відносного значення активної потужності (рис. 3) $P_1^* = f(P_2^*)$ і відносного значення середнього струму фази статора $I_{1ср} = f(P_2^*)$ від відносного значення корисної потужності (рис. 4). За результатами табл. 2

та 4 побудовано графіки залежностей коефіцієнта корисної дії (рис. 5) і коефіцієнта потужності (рис. 6) від відносного значення корисної потужності P_2 .

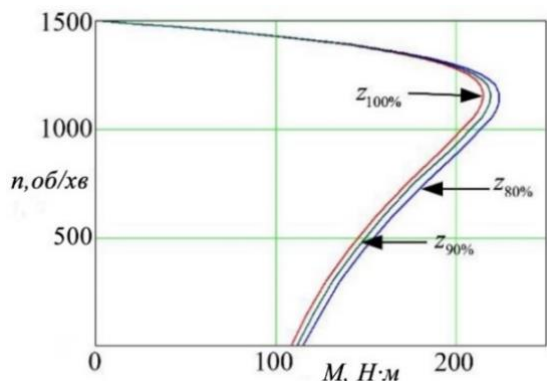


Рис. 1. Графік залежності частоти обертання вала двигуна від моменту на валу для різного пошкодження обмотки

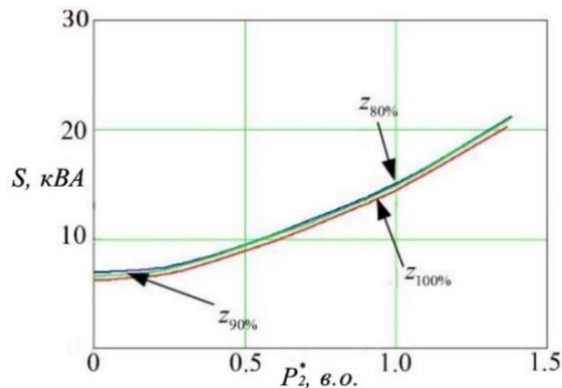


Рис. 2. Графік залежності повної потужності від корисної потужності для різного пошкодження обмотки

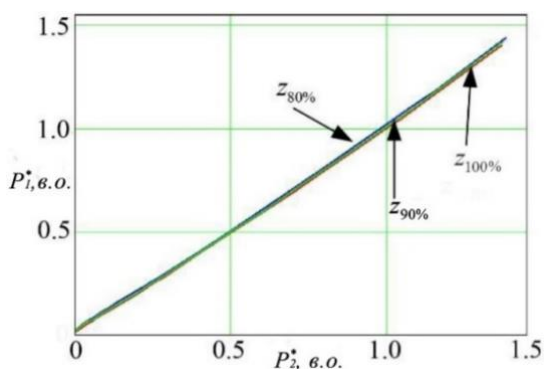


Рис. 3. Графік залежності активної потужності, що споживається з мережі, від корисної потужності для різного пошкодження обмотки

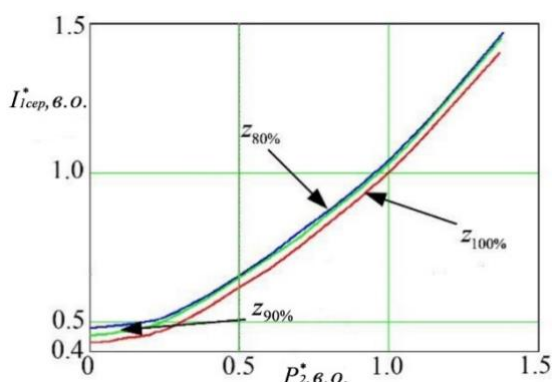


Рис. 4. Графік залежності середнього струму фази статора від корисної потужності для різного пошкодження обмотки

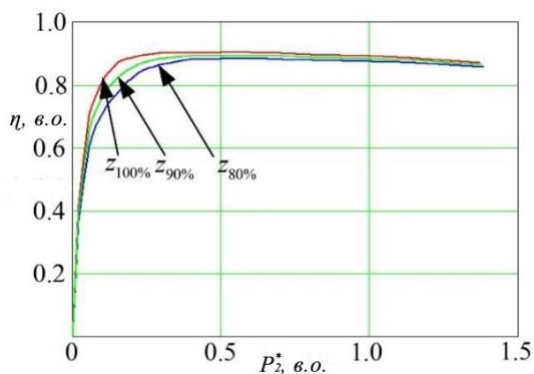


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта корисної дії від корисної потужності двигуна для різного пошкодження обмотки

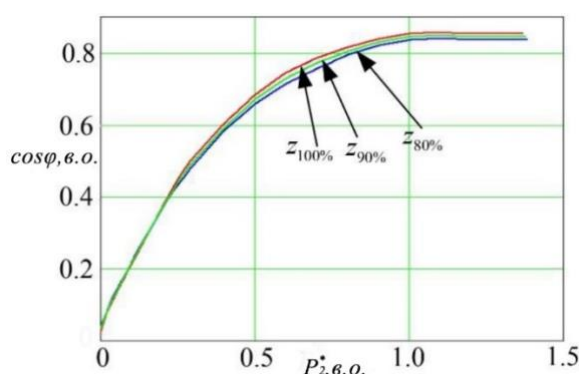


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта корисної дії від корисної потужності двигуна для різного пошкодження обмотки

З рис. 1 випливає, що зі збільшенням кількості замкнених витків в обмотці статора збільшується значення критичного моменту і пускового моменту двигуна. У той же час значення моменту в номінальному режимі не змінюється. Отже, погіршення властивостей двигуна через механічні властивості за наявності міжвиткових замкнень у фазі обмотки статора не відбувається.

З рис. 2-4 випливає, що при роботі двигуна при номінальному навантаженні та замкненні 20 % витків в одній фазі двигуна повна потужність, споживана з мережі, збільшується на 7,1 %. При цьому на 4,3 % збільшується активна потужність, споживана з мережі, і відповідно середнє значення струму у фазі статора на 7,1 %. Таке суттєве збільшення струму веде до перегріву неушкодженої частини фазної обмотки і збільшує вірогідність наступного пробою та можливої аварійної зупинки двигуна.

Міжвиткові замкнення у фазі обмотки статора також погіршують енергетичні характеристики асинхронного двигуна. Так, ККД двигуна при замкнених 20 % витків

обмотки знижується на 2,4 % (рис. 5), а коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ – на 2,7 % (рис. 6) у номінальному режимі.

Для визначення діагностичних параметрів зі встановлення наявності міжвиткових замкнень у фазі обмотки статора проведено дослідження з впливу міжвиткового замкнення на електродинамічні процеси в двигуні.

Дослідження впливу міжвиткового замкнення у фазі обмотки статора асинхронного двигуна на пульсації моменту і небаланс фазних струмів. Для встановлення параметрів двигуна при міжвиткових замкненнях проведено моделювання значень низки електродинамічних параметрів трифазного асинхронного двигуна при симетричному режимі роботи (100 %) і зменшенні комплексного опору фази A на 10 і 20 %, викликане замиканнями різної кількості витків у фазі обмотки. Результати моделювання параметрів двигуна проведено для номінального режиму та режиму холостого ходу і зведено в табл. 5.

Таблиця 5
Результати моделювання значень параметрів асинхронного двигуна за наявності міжвиткового замкнення при пошкодженнях обмотки

Параметр	Холостий хід			Номінальний режим		
	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %
1	2	3	4	5	6	7
Частота обертання n , об/хв	1498	1498	1498	1450	1450	1450
Середній електромагнітний момент $M_{сер}$, Н·м	0,380	0,506	0,508	72,443	72,695	73,989
Максимальний електромагнітний момент $M_{макс}$, Н·м	0,380	1,174	1,847	72,443	74,066	76,95
Мінімальний електромагнітний момент $M_{мін}$, Н·м	0,3804	-0,161	-0,831	72,443	71,324	71,028
Частота пульсацій моменту $f_{пульс}$, Гц	0	100	100	0	100	100
Діючий струм фази A статора I_{1A} , А	9,403	10,219	11,148	21,8	22,996	24,76
Діючий струм фази B статора I_{1B} , А	9,403	9,443	9,465	21,8	21,228	20,967
Діючий струм фази C статора I_{1C} , А	9,403	9,52	9,627	21,8	21,389	21,297
Діючий струм фази A ротора I_{2A} , А	0,091	0,177	0,317	18,713	19,286	19,914
Діючий струм фази B ротора I_{2B} , А	0,091	0,115	0,278	18,713	18,661	18,268

1	2	3	4	5	6	7
Діючий струм фази С ротора I_{2C} , А	0,091	0,292	0,45	18,713	19,081	19,491
Коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту $k_{пульсМ}$, %	0	131,84	263,71	0	2,001	3,991
Коефіцієнт небалансу фазних струмів статора, $k_{нбІ}$, %	0	8,253	16,341	0	8,11	15,916

Коефіцієнти пульсації електромагнітного моменту в табл. 5 розраховані за формулою [16]

$$k_{пульсМ} = \frac{M_{макс} - M_{мін}}{2 \cdot M_{сер}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $M_{макс}$ – максимальне значення моменту, Н·м;

$M_{мін}$ – мінімальне значення моменту, Н·м;

$M_{сер}$ – середнє значення моменту, Н·м.

Коефіцієнти небалансу струмів фаз статора (табл. 5) визначаються за формулою [16]

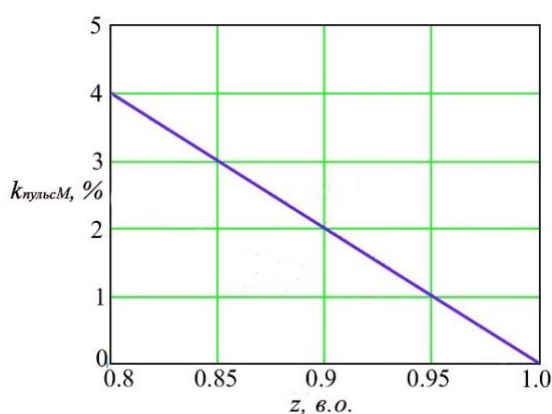
$$k_{нбІ} = \frac{I_{ст.макс} - I_{ст.мін}}{I_{ст.сим.р}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де $I_{ст.макс}$ – максимальне значення фазного струму статора, А;

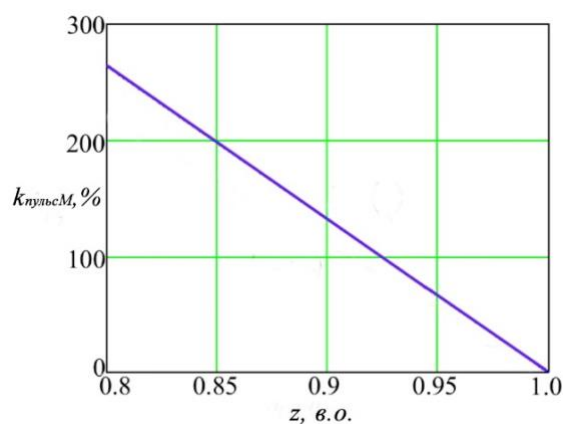
$I_{ст.мін}$ – мінімальне значення фазного струму статора, А;

$I_{ст.сим.р}$ – значення фазного струму статора при симетричному режимі.

За результатами моделювання з табл. 5 побудовано графіки залежності коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту (рис. 7, а, б) і залежності коефіцієнта небалансу фазних струмів статора (рис. 8, а, б) від кількості неушкоджених витків у відносному вираженні через відповідну зміну комплексного опору z для режиму холостого ходу та номінального режиму.



а



б

Рис. 7. Графіки залежності коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту від пошкоджень фази статора:

а – режим холостого ходу; б – номінальний режим

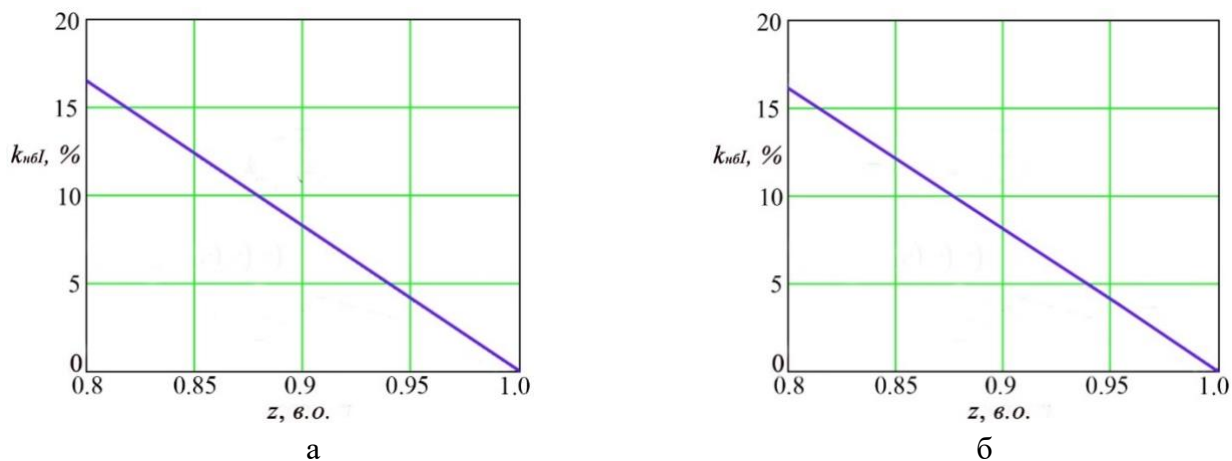


Рис. 8. Графіки залежності коефіцієнта небалансу фазних струмів від пошкоджень фази статора: а – режим холостого ходу; б – номінальний режим

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільш істотні зміни відбуваються з пульсацією електромагнітного моменту при зміні комплексного опору однієї з фаз на холостому ході, коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту досягає 263,71 %. У номінальному режимі значення цього коефіцієнта складає 3,99 % при замиканні 20 % витків фази обмотки. Це свідчить про доцільність використання вібраційного методу діагностики цього пошкодження виключно в режимі холостого ходу, тобто при стендових випробуваннях. При навантаженні двигунів використання вібраційних систем ускладнено у зв'язку з незначними відхиленнями коефіцієнта пульсацій, що може бути викликано іншими пошкодженнями, або порушенням якості напруги живлення. Коефіцієнт небалансу фазних струмів статора (рис. 8) при зміні комплексного опору фази двигуна має однаковий характер змін та отриманих значень для номінального режиму і режиму холостого ходу, що робить використання діагностичного струмового методу більш універсальним.

Висновки. У статті проведено комплекс досліджень впливу міжвиткового замикання на параметри та характеристики асинхронних двигунів у період їхньої

експлуатації та визначено рівень зниження економічності використання транспортного обладнання. У результаті проведених досліджень також запропоновано діагностичні методи для встановлення міжвиткового замикання в електроприводах транспортних засобів.

Проведені дослідження впливу міжвиткового замикання на механічні характеристики показали, що при збільшенні ступеня міжвиткового замикання у фазі статора критичний і пусковий моменти двигуна зростають, а зона номінального режиму в діапазоні робочих частот обертання двигуна змінюється незначно.

При номінальному режимі роботи двигуна, за результатами досліджень, зі збільшенням кількості замкнених витків обмотки фази до 20 % загальної їхньої кількості зростає повна потужність, споживана з мережі, на 7,1 %, активна потужність, споживана з мережі, на 4,3 %, і збільшується на 7,1 % середнє значення струму фази статора.

Після проведення досліджень міжвиткових замкнень у фазі обмотки статора визначено зниження енергетичних показників асинхронного двигуна: ККД двигуна при замкнених 20 % витків фазної обмотки знижується на 2,4 %, а коефіцієнт

потужності $\cos\varphi$ – на 2,7 % у номінальному режимі роботи двигуна.

Таке збільшення струму веде до перегріву неушкодженої частини фазної обмотки та збільшує вірогідність наступного міжфазного пробоя і руйнування корпусної ізоляції з можливою аварійною зупинкою двигуна. Рівень збільшення струму статора за наявності міжвиткових замикань може бути використаний для прогнозування періоду безаварійної роботи через визначення температурного режиму пошкодженої фази.

З цього випливає, що своєчасне виявлення наявності та ступеня міжвиткового замикання є актуальним завданням, що сприяє підвищенню надійності роботи транспортних засобів.

Для визначення діагностичних проявів пошкоджень обмотки статора проведено дослідження впливу міжвиткових замикань на пульсації електромагнітного моменту і небаланс фазних струмів статора. За результатами моделювання встановлено, що коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту в режимі холостого ходу досягає 263,67 %. У номінальному режимі значення цього коефіцієнта складає 3,99 % при замиканні 20 % витків фази обмотки. Це вказує на

доцільність використання вібраційного методу діагностики цього пошкодження виключно в режимі холостого ходу, тобто при стендових випробуваннях, де вібраційні прояви мають більш виражений характер. Коефіцієнти небалансу фазних струмів статора при зміні комплексного опору фази обмотки мають близькі значення для режиму холостого ходу ($k_{нбГ} = 16,34$ %) і номінального режиму ($k_{нбГ} = 15,91$ %).

Проведені дослідження свідчать про більшу ефективність використання струмових методів діагностики при оцінюванні та прогнозуванні стану обмотки статора асинхронного електродвигуна у складі діагностичних систем транспортних засобів.

Результати проведених досліджень актуальні для оцінювання ступеня відхилень параметрів працюючих електроприводів при пошкодженні обмотки статора та можуть бути використані при створенні систем функціональної діагностики транспортного обладнання у складі приводів транспортних засобів, що працюють постійно під навантаженням, для підвищення надійності та ефективності роботи транспортної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Merizalde Y., Hernandez-Callejo L., Duque-Perez O. State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors. *Energies* [online]. 2017. 10(7). P. 1056. URL: <https://doi.org/10.3390/en10071056>.
2. Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L. et al. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: a review. *arch computer methods eng* 26. 2019. P.1221–1238. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>.
3. Mairte J., Gaboury S., Bouchard B., Bouzouane A. A new computational method for stator faults recognition in induction machines based on hyper-volumes. In: 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). IEEE [online]. 2015. P. 216-220. ISSN: 2154-0357. URL: <https://doi.org/10.1109/EIT.2015.7293343>.
4. Губаревич О. В. Надійність і діагностика електрообладнання: підручник. Северодонецьк : Вид-во СЧУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.
5. Губаревич О. В., Голубева С. М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету»*. Серія : Електротехніка і енергетика. Покровськ:

- Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». 2019. № 1(21). С. 55-63. URL: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>.
6. Bento F., Adouni A., Muxiri A. C., Fonseca D. S., Marques Cardoso A. J.. On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults. *IET Electric Power Applications*. 2021. Vol. 15. N. 1. P. 51-62. URL: <https://doi.org/10.1049/elp2.12008>.
 7. Asfani D. A., Negara I. M. Y., Hernanda I. G. N. S., Fahmi D., Muljadi E. & Nelms R. M. (2020, October). Methods to Determine the Stator Inter-turn Short Circuit in an Induction Motor with Installed Rotor. In: 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2020. P. 7-13. URL: <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236051>.
 8. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: монография / А. П. Черный, Д. И. Родькин, А. П. Калинов, О. С. Воробейчик. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2008. 246 с.
 9. Wissam Dehina & Mohamed Boumehraz. Experimental investigation in induction motors using signal processing techniques for early detection of inter-turn short circuit faults. *International Journal of Modelling and Simulation*. 42:5. 2022. P. 855-867. URL: <https://doi.org/10.1080/02286203.2021.2001635>.
 10. Muxiri A. C. P., Bento F., Fonseca D. S. B. and Marques Cardoso A. J. Thermal Analysis of an Induction Motor Subjected to Inter-Turn Short-Circuit Failures in the Stator Windings. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. 2019. P. 1-5. URL: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743076>.
 11. Adouni A., J Marques Cardoso A. Thermal Analysis of Low-Power Three-Phase Induction Motors Operating under Voltage Unbalance and Inter-Turn Short Circuit Faults. *Machines*. 2021. Vol. 9. N. 1. P. 2-11. URL: <https://doi.org/10.3390/machines9010002>.
 12. Hashish E., Miller K., Finley W. and Kreitzer S. Vibration Diagnostic Challenges: Case Studies in Electric Motor Applications. *IEEE Industry Applications Magazine*. July-Aug. 2017. Vol. 23. N. 4. P. 22-34. URL: <https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600718>.
 13. Álvaro Souza de Araújo, Oberdan Pinheiro Rocha, Alex Álisson Bandeira Santos, Computational Model for Electrical Motors Condition Analysis and Monitoring, VI Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia. *Blucher Engineering Proceedings*. 2020. Vol. 7. N 2. P. 543-550. ISSN 2357-7592. URL: <https://doi.org/10.34178/jbth.v5i2.206>.
 14. Suechoey B., Siriporananon S., Chupun P., Boonkhun C. & Chompoinwai C. (2021). Performance Analysis and Fault Classification in a Large Electric Motor Using Vibration Assessment Technique. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. 2021. 14(1). P. 124–133. URL: <https://doi.org/10.22266/ijies2021.0228.13>.
 15. Goolak S., Gubarevych O., Yermolenko E., Slobodyanyuk M. & Gorobchenko O. Mathematical Modeling of an Induction Motor for Vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 2(2). P. 25–34. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>.
 16. Goolak S., Gerlici J., Tkachenko V., Sapronova S., Lac T., Kravchenko K. Determination of parameters of asynchronous electric machines with asymmetrical windings of electric locomotives. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. 21(2). P. C24-C31. URL: <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>.
 17. Gubarevych O., Golubieva S., Melkonova I. Comparison of the results of simulation modeling of an asynchronous electric motor with the calculated electrodynamic and energy characteristics. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. R. 98. N 10/2022. P. 61-66. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.11>.
-

18. Goolak S., Gerlici J., Gubarevych O., Lack T. & Pustovetov M. Imitation Modeling of an Inter-Turn Short Circuit of an Asynchronous Motor Stator Winding for Diagnostics of Auxiliary Electric Drives of Transport Infrastructure. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2021. 23(2). P. C65–C74. URL: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.C65-C74>.

Губаревич Олег Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0001-7864-0831. E-mail: oleg.gbr@ukr.net.

Oleg Gubarevych, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electromechanics and Rolling Stock, The State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0001-7864-0831. E-mail: oleg.gbr@ukr.net.

Статтю прийнято 09.10.2022 р.

УДК 656.225

ЗБІЛЬШЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗДІЙСНЕННЯ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ЗА РАХУНОК ЇХНЬОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Кандидати техн. наук А. Л. Кравець, А. М. Кравець, О. О. Шапатіна

INCREASING THE SPEED OF FREIGHT TRANSPORTATION BY MEANS OF OPTIMIZATION

PhD (Tech.) Anna Kravets, Andrii Kravets, Olga Shapatina

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273666>



Анотація. У роботі розглянуто питання збільшення швидкості доставки вантажів на базі існуючих потужностей, інфраструктури та ресурсів. Запропоновано математичне вирішення завдання оптимізації – досягнення певного рівня обслуговування при мінімальних витратах.

Запропоновані дослідження дозволять зробити висновок про переваги або недоліки перевезень швидкісними вантажними поїздами порівняно зі звичайними вантажними поїздами та доцільність їх впровадження на певних ділянках.

Ключові слова: доставка вантажів, швидкісний рух, швидкісний вантажний поїзд, контейнерні перевезення.

Abstract. The article considers increasing the speed of freight delivery by rail using the existing capacity, infrastructure and resources. Possible options and technologies to speed up the delivery of freight are analyzed on the basis of experience of other countries. A mathematical solution to the optimization problem is proposed – achieving a certain level of service with minimal costs associated with the downtime of handling facilities.

The purpose of the study is to determine to what extent such characteristics as transit time, queueing time for loading of goods, etc., can change during the transition from conventional freight transportation to high-speed one.

Mathematical simulation methods were used to estimate the change in the characteristics of freight transportation when the speed increases. Freight transportation was considered as a

mathematical queuing system (QS). Accordingly, the characteristics of two Qs with the same intensity of the order workflow and different intensities of the service workflow at a service are compared. That is, the characteristics of movement of freight trains in the transition from regular traffic to high-speed traffic are compared.

The formulas proposed in the paper will allow to study the dependence of the number of freight trains and the downtime of handling facilities on the intensity of the service workflow, i.e. on the speed of movement. It will also allow to determine intensity of a service workflow which is necessary to achieve the given average time which an order stays in system, i.e. to find the speed of freight traffic required to achieve the given average trip time.

Conducting this research will allow to conclude about advantages or disadvantages of transportation by high-speed freight trains in comparison with conventional freight trains and expediency of their introduction on certain sites.

Keywords: *freight delivery, high-speed traffic, high-speed freight train, container transportation.*

Вступ. Швидкісний рух – це рух, що дозволяє здійснювати перевезення пасажирів і вантажів зі швидкістю 140-200 км/год по модернізованих існуючих лініях.

Українська залізниця має розвинену мережу магістралей, по яких курсують як вантажні, так і пасажирські поїзди. Розведення цих видів руху на відокремлені лінії – це дуже дорогий проєкт. Тому розвиток швидкісного руху необхідно розглядати, по-перше, в умовах поєднання перевезень вантажів і пасажирів; по-друге, в умовах збереження звичайного вантажного руху.

Отже, консолідація перевезень вантажів має зберігати технологію виконання перевезення в цілому, але містити технологію, що передбачає швидку обробку та доставку окремих груп вантажів (вантажних одиниць).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У Європі широко розвинена система організації контейнерних поїздів місцевого значення, що курсують за розкладом. Відправлення поїзда відбувається в строго запланований час, незалежно від його завантаження. Одним із прикладів є челночний поїзд RailXpress, розроблений швейцарською компанією, InnovaTrain AG. Метою таких поїздів є максимально швидко перевезення невеликої кількості контейнерів і знімних

стандартних вантажних одиниць за встановленим розкладом при певному автомобільно-залізничному сполученні. Крім того, такі поїзди мають можливість переміщатися по неелектрифікованих залізничних коліях, оскільки їхні локомотиви працюють на дизельному паливі та електроенергії. Це дозволяє подавати вагони під завантаження-вивантаження на колії незагального користування. Особливістю вагонів поїзда RailXpress є оснащення спеціальним обладнанням, що дає змогу здійснювати горизонтальне перевантаження контейнерів з вагона на автомобіль без використання кранів [1].

У Західній Європі ключову роль в організації вантажопотоків відіграють консолідаційні склади і рух товарів між складськими комплексами і одержувачами.

Впровадження в Німеччині логістичних технологій у пакувальне виробництво в поєднанні з контейнеризацією і зменшенням запасів забезпечило у 2021 році зниження витрат на 50%. Одночасно покращено обслуговування замовників за рахунок організації поставок «точно в строк» [5].

Створенню і використанню нових видів підйомно-транспортного обладнання в логістиці приділяється велика увага. Фірма GE Energy Power Conversion обладнала контейнерні крани (STS)

подвійним вантажозахоплювальним спреїдерним пристроєм, що дає змогу одночасно працювати з чотирма контейнерами різної маси. Спреїдер виконує автоматичне зчеплення і розчеплення з контейнером. Спеціальний пристрій у реальному часі розраховує умови захоплення контейнерів різної маси та в автоматичному режимі забезпечує їх реалізацію [3, 6].

Територією України на регулярній основі курсує 36 контейнерних поїздів, організованих АТ «Укрзалізниця», а контейнерні перевезення складають 2,3 % загального обсягу перевезень вантажів залізничним транспортом України. З 8 червня 2020 року територією чотирьох країн почали курсувати прямі контейнерні поїзди з Китаю до України. І відповідно до спільного меморандуму АТ «Укрзалізниця» та міжнародна логістична компанія DHL Global Forwarding планують розвивати контейнерні залізничні перевезення Китай – Європа [2, 7].

Однак однією з головних причин низького рівня контейнерних перевезень є нестача перевантажувальних потужностей. Адже їхня головна особливість полягає в тому, що перша і «остання миля», тобто доставка безпосередньо замовнику, завжди залишається за автотранспортом. Тому для перевантаження необхідна широка мережа спеціально обладнаних терміналів [4, 8].

Отже, перехід до швидкісних вантажних контейнерних перевезень є перспективним, однак і високовитратним проектом. Підготовка до його реалізації потребує детального економічного аналізу. Але економічний аналіз неможливий без оцінювання змін транспортних характеристик вантажоперевезень, викликаних переходом до швидкісного руху. При цьому необхідно оцінити не тільки характеристики, що прямо впливають з технічних характеристик швидкісних вантажних поїздів, таких як середня швидкість составів, а й похідні характеристики. Наприклад, при

впровадженні швидкісних перевезень на деякому маршруті зі сталим вантажопотоком необхідно розрахувати, на скільки зміняться такі похідні, як середня кількість вантажів в очікуванні перевезення, середній час у дорозі, включаючи очікування завантаження, середній рівень завантаження состава і такі інші. Розуміння залежності цих характеристик від швидкості руху допоможе приймати правильні рішення щодо доцільності впровадження швидкісних перевезень.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є вивчення того, наскільки такі характеристики, як час знаходження вантажів у дорозі, час очікування навантаження вантажів та інше, можуть змінитися при переході від звичайних вантажних перевезень до швидкісних. Для досягнення поставленої мети необхідно розробити методику вирішення завдань оцінювання основних виробничих показників вантажних перевезень, що виникають при переході від звичайних до швидкісних перевезень, серед яких найбільш визначальними є середня швидкість пересування вантажів у дорозі, середній час очікування навантаження, середня кількість поїздів, що простоюють, тощо.

Основна частина дослідження. Для оцінювання зміни характеристик вантажних перевезень при збільшенні швидкості руху пропонується використовувати методи математичного моделювання. Як математичний метод використовується теорія масового обслуговування, оскільки за її допомогою можна вирішити завдання оптимізації, як саме досягти певного рівня обслуговування при мінімальних витратах, пов'язаних з простоям обслуговуючих пристроїв.

Вантажні перевезення будемо розглядати як математичну систему масового обслуговування (СМО). У математиці СМО складається з декількох

паралельно працюючих сервісів, що обслуговують заявки. Заявки можуть перебувати як на обслуговуванні, так і в очікуванні обслуговування.

Сервісами є швидкісні або звичайні вантажні поїзди, а заявками - «партії вантажів» (сукупності вантажів, що наповнюють один такий вантажний поїзд).

Математична постановка задач:

1) порівняти характеристики двох СМО типу $M/M/c/\infty$ з однією і тією самою інтенсивністю потоку заявок і різними інтенсивностями потоку обслуговування одним сервісом, тобто порівняти характеристики руху вантажних поїздів при переході від звичайного руху до швидкісного;

2) на підставі отриманих формул вивчити залежність кількості вантажних поїздів і тривалості простою засобів обслуговування від інтенсивності потоку обслуговувань, тобто швидкості руху;

3) вивчити інтенсивність потоку обслуговування, необхідного для досягнення заздалегідь заданої середньої тривалості перебування заявки в СМО, тобто знайти швидкість вантажного руху, необхідну для досягнення заздалегідь заданого середнього часу перебування вантажів у процесі перевезення.

Пропонована методологія вирішення поставлених завдань:

1) порівняння характеристик двох СМО типу $M/M/c/\infty$ з однією і тією самою інтенсивністю потоку заявок і різними інтенсивностями потоку обслуговування одним сервісом, тобто порівняння характеристик руху вантажних поїздів при переході від звичайного вантажного руху до швидкісного.

Нехай у системі є c вантажних поїздів (швидкісних або звичайних). Вантажі надходять на станцію обслуговування партіями з однаковою інтенсивністю, що дорівнює μ партій на добу. Інтенсивність потоку обслуговування (завантаження-доставка-розвантаження-повернення назад) звичайним вантажним поїздом складає $\mu_{шв}$

партії на один вантажний поїзд за добу, а швидкісним вантажним поїздом – $\mu_{шв}$ партії на один поїзд за добу.

Потрібно розрахувати всі основні характеристики СМО за допомогою стандартних формул теорії масового обслуговування для СМО такого типу.

Щоб простежити закономірність зміни основних характеристик СМО від інтенсивності потоку обслуговувань, будемо змінювати її від $\mu_{шв}$ партії за добу до μ партії за добу з кроком $\Delta\mu$ партії за добу;

2) вивчення залежності кількості вантажних поїздів і відсотка простою засобів обслуговування від інтенсивності потоку обслуговувань, тобто швидкості руху.

Припустимо, що потрібно визначити кількість вантажних поїздів, необхідну для того, щоб знизити тривалість перебування заявки в СМО до T діб. На підставі цього дослідження можна дійти висновку про переваги чи недоліки перевезень зі швидкісними вантажними поїздами порівняно з перевезеннями зі звичайними вантажними поїздами.

При вирішенні завдань подібного роду необхідно враховувати, що при збільшенні кількості сервісів (у нашому випадку поїздів) буде збільшуватись також кількість сервісів (поїздів), не зайнятих роботою. Ця кількість характеризується так званім відсотком простою сервісів (відсотком простою засобів обслуговування) X . Його можна обчислити так. Позначимо через \bar{c} середню кількість сервісів, що працюють. Тоді відсоток простою засобів обслуговування можна розрахувати за формулою

$$X = \frac{c - \bar{c}}{c} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Середню кількість сервісів, що працюють, визначимо як різницю між середньою кількістю заявок, що

знаходяться в системі, L_s і середньою кількістю заявок у черзі L_q , тобто

$$\bar{c} = L_s - L_q. \quad (2)$$

Середня кількість заявок, що знаходяться в системі, L_s розраховується за формулою

$$L_s = L_q + \rho, \text{ де } \rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3)$$

Отже, отримуємо формулу для обчислення відсотка простою засобів обслуговування

$$X = \left(1 - \frac{\lambda}{c\mu}\right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Відповідно до цієї формули будемо проводити обчислення відсотка простою засобів обслуговування X .

Для вирішення поставленого завдання будемо варіювати кількість поїздів c в системі;

3) вивчення інтенсивності потоку обслуговування, необхідного для досягнення заздалегідь заданої середньої тривалості перебування заявки в СМО, тобто вивчення швидкості вантажного руху, необхідної для досягнення заздалегідь заданого середнього часу перебування вантажів при перевезенні.

Знов припустимо, що ми хочемо зменшити середню тривалість перебування заявки в СМО до T діб. Визначимо, якою має бути інтенсивність потоку обслуговувань μ для досягнення цієї мети.

Будемо вирішувати це завдання шляхом варіювання інтенсивності потоку обслуговувань μ за допомогою декількох ітерацій. Обчислення проводяться на основі формули для середньої тривалості перебування заявки в СМО

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda}, \quad (5)$$

де L_s - середня кількість заявок, що знаходяться в системі,

$$L_s = L_q + \rho, \text{ де } \rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (6)$$

де L_q - середня кількість заявок у черзі,

$$L_q = \frac{\rho^{c+1}}{(c-1)!(c-\rho)^2} p_0, \quad (7)$$

де p_0 - імовірність того, що в СМО знаходиться 0 заявок,

$$p_0 = \left(\sum_{n=0}^{c-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^c}{c!} \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho}{c}} \right) \right)^{-1}. \quad (8)$$

Вирішення завдання оптимізації вантажних перевезень за цією методикою дозволить зробити висновок про переваги або недоліки перевезень швидкісними вантажними поїздами порівняно зі звичайними вантажними поїздами.

У подальших дослідженнях планується вирішення поставлених математичних задач на конкретних значеннях для отримання залежностей і характеру змін показників при певних умовах.

Висновки. Аналіз зарубіжних методів обслуговування вантажних перевезень показав, що для підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту, якості послуг з доставки вантажів необхідно:

1. Розвивати транспортну інфраструктуру з будівництвом сучасних автоматизованих і механізованих вантажних терміналів для узгодженої взаємодії видів транспорту, а також

вантажно-розвантажувальні потужності з новітнім обладнанням.

2. Розвивати контейнерні перевезення та удосконалювати доставку «точно в строк» і «від дверей до дверей», що сприяє скороченню строків доставки контейнерів; розширювати номенклатуру вантажів, що перевозяться в контейнерах.

3. Організувати рух вантажних поїздів за розкладом; підвищення рівня маршрутизації дозволить прискорити доставку вагонів.

4. Впроваджувати нові типи рухомого складу, у тому числі такі, що здатні здійснювати перевезення з пасажирською швидкістю.

Запропоновано методику вирішення завдань оцінювання основних виробничих показників вантажних перевезень, що виникають при переході від звичайних до швидкісних перевезень, таких як середня швидкість руху вантажу в дорозі, середній час очікування навантаження, середня кількість поїздів, що простоюють, і таке

інше. Основним математичним інструментом побудованої методики є методи математичної теорії масового обслуговування.

Розглянута методика дає змогу:

- проводити порівняння змін характеристик обслуговування вантажних перевезень при переході від звичайних до швидкісних вантажних перевезень;

- вивчати залежність кількості вантажних поїздів і відсотка простою засобів обслуговування від швидкості руху і визначати кількість вантажних поїздів, необхідну для досягнення середнього часу перевезення вантажів;

- вивчати залежність швидкості руху, необхідної для досягнення заздалегідь заданого відсотка простою вантажних поїздів.

Отже, з вирішенням завдання оптимізації вантажних перевезень за цією методикою можна дійти висновку про переваги або недоліки перевезень швидкісними вантажними поїздами порівняно зі звичайними вантажними поїздами.

Список використаних джерел

1. Payne Robert. Frankfurt Airport pioneering intermodal air-rail development. *Japan railway and transport review*. 19, March, 1999. P. 31-35. URL: http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr19/pdf/F31_Payne.pdf (дата звернення: 14.09.22 р.).

2. Укрзалізниця та міжнародна логістична компанія DHL Global Forwarding розвиватимуть контейнерні залізничні перевезення з Китаю до Європи / Укрінформ: Мультимедійна платформа іномовлення України. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3144686-ukrzaliznica-ta-dhl-rozvivatimut-vantazni-perevezenna-z-kitau-do-evropi.html> (дата звернення: 20.09.2022 р.).

3. «Ліски» Едвін Берзінш – про розвиток контейнерних перевезень на УЗ та нові транзитні напрямки. URL: <https://mintrans.news/zhd/kerivnik-liski-edvin-berzinsh-pro-rozvitok-konteinernikh-perevezen-na-uz-ta-novi-tranzitni-napryamki> (дата звернення: 12.11.22 р.).

4. Контейнерні перевезення та ринок термінальних послуг на залізниці України – що має змінитися? URL: <https://railexpoua.com/novyny/pro-rynok-terminalnykh-posluh-na-zaliznytsi-ukrainy/> (дата звернення: 14.11.22 р.).

5. Railways role in intermodality and the digitalization of transport documents. URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp24/ECE_TRANS_262_E_Web_Optimized.pdf (дата звернення: 15.10.22 р.).

6. Dongping Song. A Literature Review, Container Shipping Supply Chain: Planning Problems and Research Opportunities. *Logistics*. 2021. 5 (2). P. 41-41. URL: https://livrepository.liverpool.ac.uk/3127602/1/Logistics-2021_05-00041_CSSC_literature_review.pdf (дата звернення: 15.10.22 р.).

7. Ying Xie, Dong-Ping Song. Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty. *Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review*. November 2018. P. 88-109. URL: <https://daneshyari.com/article/preview/11011933.pdf> (дата звернення: 14.11.22 р.).

8. Dong C., Akram A., Andersson D., Arnäs P.-O., Stefansson G. The impact of emerging and disruptive technologies on freight transportation in the digital era: current state and future trends. *International Journal of Logistics Management*. 2. 2021. P. 386-412. URL: <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2020-0043> (дата звернення: 19.11.22 р.).

Кравець Анна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (098) 2100423. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-1165-1960.

Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (050) 5039823. E-mail: kravets_am@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-3251-6576.

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

Kravets Anna Leonidivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Management of Freight and Commercial Work, Ukrainian state university of railway transport. Тел.: +38 (098) 2100423. E-mail: docent.kravets.uvkr@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0003-1165-1960.

Kravets Andrii, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. Тел.: +38 (050) 5039823. E-mail: kravets_am@ukr.net. ORCID ID: 0000-0002-3251-6576.

Shapatina Olha Oleksandrivna, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Management of Freight and Commercial Work, Ukrainian state university of railway transport. Тел.: +38 (066) 8124889. E-mail: shapatina.uvkr@kart.edu.ua. ORCID ID: 0000-0002-9185-6212.

Статтю прийнято 28.11.2022 р.

УДК 625.748.32

СИСТЕМА БЕЗПЕКИ ПІШОХОДІВ RS PSS

Кандидати техн. наук О. О. Калмиков, Д. С. Захаров, асп. С. М. Грибенюк, магістрант Д. А. Алатаєв

PEDESTRIAN SAFETY SYSTEM RS PSS

PhD (Tech.) O.O. Kalmykov, PhD (Tech.) D.S. Zakharov, applicant S.M. Hrybenyuk, master D.A. Alataiev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273667>



Анотація. Система безпеки пішоходів являє собою комплекс конструктивних рішень, основним призначенням яких є створення безпечних умов для пішоходів на потенційно небезпечних ділянках автомобільних доріг. У статті наведено скорочений аналіз статистичних даних щодо кількості ДТП у м. Харків протягом останніх років, за результатом якого обґрунтовується необхідність оновлення інфраструктури міста в розрізі безпеки пішоходів. Відомі конструктивні рішення влаштування островків безпеки

пішоходів мають певні недоліки, що спонукало розроблення конструктивної системи RS PSS. У роботі наведено опис та обґрунтування конструктивних рішень системи RS PSS. Також подано аналіз напружено-деформованого стану запропонованих конструктивних рішень, за результатами якого складено рекомендації з використання певних типорозмірів досліджуваних конструкцій.

Ключові слова: безпека пішоходів, болард, рефюдж, пішохідна плита, кріплення боларду.

Abstract. The pedestrian safety system is a complex of constructive solutions, the main purpose of which is to create safe conditions for pedestrians on potentially dangerous sections of highways. The article provides an abbreviated analysis of statistical data on the number of road accidents in the city of Kharkiv in recent years, the result of which justifies the need to update the city's infrastructure in terms of pedestrian safety. Known constructive solutions for arranging pedestrian safety islands have certain shortcomings, which prompted the development of the RS PSS constructive system. A distinctive feature of the proposed system is that it consists of separate elements. The main structural elements of the system are a bollard - a protective element of the road infrastructure, a refuge - a reinforced concrete element into which the bollard and the pedestrian slab are attached. The developed system provides a line of standard sizes of each of the elements, which differ in size and ability to absorb external loads. Depending on the place of installation, the type of highways, and other factors, a certain combination of system elements is used. The work provides a description and justification of constructive solutions of all constituent elements of the RS PSS system. The most responsible part of the system is the attachment of the bollard to the refuge. The structural implementation of this node is made in the form of an embedded part, into which the bollard is directly attached. Special attention is paid to the reliable fastening of the part in the reinforced concrete shelter. The work also presents an analysis of the stress-strain state of the proposed constructive solutions. The calculations were performed in the Autodesk fusion 360 software complex. Based on the results of the calculations, recommendations were made for the use of certain standard sizes of the structures under study. This scientific study is the basis for the development of technical conditions for the manufacture of the RS PSS pedestrian safety system.

Keywords: pedestrian safety, bollard, refuge, pedestrian slab, bollard attachment.

Вступ. За даними Національної поліції України, за 2021 рік на дорогах України сталося близько 154 тисяч дорожньо-транспортних пригод, з них з постраждалими – більше 20 тисяч. З кожним роком, не дивлячись на зміни в законодавстві, що роблять правила дорожнього руху більш суворими, кількість ДТП зростає. Так, у Харківській області, і в м. Харків зокрема, за 10 місяців 2021 року в ДТП постраждало 1287 осіб [1]. До одного з найрезонансних ДТП з постраждалими можна віднести аварію, що сталася в самому центрі міста, на проспекті Науки. Люди стояли на «острівці безпеки» (ОБ), але, на превеликий жаль, він їх не зміг захистити. 22-річний громадянин Єгипту на автомобілі Volkswagen Passat, грубо

порушивши правила дорожнього руху, налетів на острівець безпеки та збив чотирьох людей (рис. 1).



Рис. 1. Аварія на просп. Науки, м. Харків, 7 листопада 2020 року

На рис. 1 видно, що автомобіль просто наїхав на острівця безпеки та збив пішоходів. Острівця не сповільнив, не зупинив і не перенаправив автомобіль в інший бік від пішоходів. У нормативних документах [2, 3] за висотою над проїзною частиною острівці поділяють на такі класи: **клас 0** – виділено на проїзній частині розміткою; **клас 1** – конструктивно підняті над проїзною частиною та обрамлені бордюром висотою (0,05–0,12) м, які транспортні засоби (ТЗ) можуть переїхати з незначними труднощами; **клас 2** – конструктивно підняті над проїзною частиною і обрамлені бордюром висотою 0,15 м, які ТЗ важко переїхати; **клас 3** – конструктивно підняті над проїзною частиною та обрамлені бордюром висотою понад 0,15 м або острівці, розташовані на розділювальній смузі та захищені огороженням першої групи. Як бачимо на цьому прикладі, острівця безпеки висотою 15 см недостатньо захищає пішоходів. У той же час збільшення його висоти в центральній частині міста, на історичних

вулицях суперечить вимогам архітектурної виразності. Тому виникає необхідність доопрацювати існуючі рішення та знайти консенсус між безпекою, нормативними документами та зовнішнім виглядом ОБ, встановлювані вулицями міста.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У країнах Європейського Союзу кількість ДТП в декілька разів менша, ніж в Україні. До країн з найбільш безпечними дорогами належить Швейцарія. У нормативних документах Швейцарії з дорожнього будівництва [3, 4] до геометричних розмірів ОБ висуваються приблизно такі самі вимоги, як і наших. Однак виключенням є те, що у Швейцарії на ОБ обов'язковим є встановлення захисних болардів (рис. 2). Болард – захисний елемент дорожньої інфраструктури, що являє собою несучу конструкцію для запобігання шкоди людському життю при дорожньо-транспортних пригодах. Конструктивно являє собою круглу порожню трубу, закріплену в бетонному фундаменті.



Рис. 2. Зовнішній вигляд острівця безпеки з захисним болардом, Швейцарія

У світовій практиці широко використовується система безпеки пішоходів від тарана автомобілів (болардів). За конструктивними особливостями вони поділяються на автоматичні,

напівавтоматичні та стаціонарні. Залежно від типу можуть виконувати функцію розмежування території, регулювання транспортних потоків, а також захисту об'єктів від можливих актів вандалізму з

застосуванням великогабаритних автомобілів (у тому числі вантажних).

До основних виробників захисних болардів, можна віднести FAAC, BFT, SAME (Італія) і Hörmann (Німеччина) [5].

За несучою здатністю вони поділяються так: від розмежувальних, що виконують функцію розділення потоків, до захисних, здатних зупинити вантажівку на швидкості 53 км/год (рис. 3).

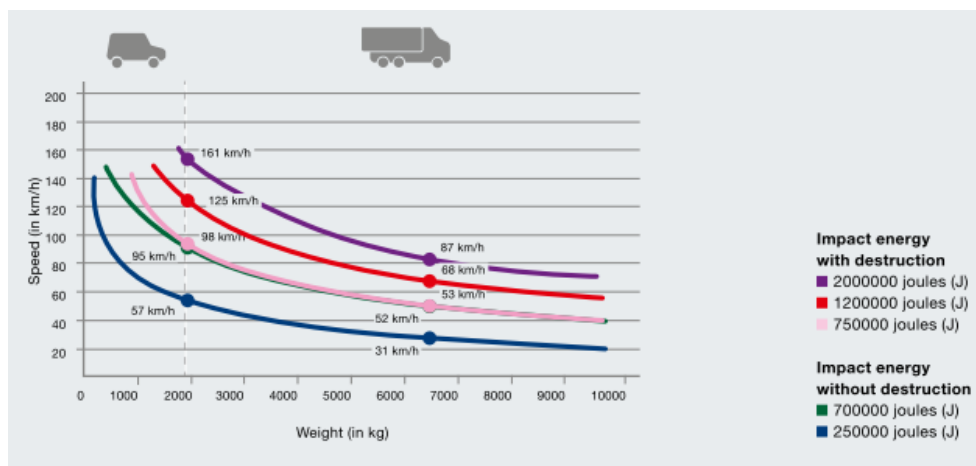


Рис. 3. Несуча здатність захисних болардів (Hörmann)

Чимало сучасних наукових досліджень присвячено розробленню інноваційних конструктивних рішень теоретичного та експериментального дослідження несучої здатності проти-таранних захисних конструкцій [7-11]. Наприклад, у роботі [12] запропоновано використовувати стільникову структуру. Відомо, що вона поглинає енергію удару з його поступовим пластичним руйнуванням і високою здатністю нести навантаження та допускати різноманітні структурні конструкції шляхом регулювання геометричних параметрів. Ця структура служить не тільки для безпеки пішоходів, але і водія (рис. 4).

Оглянуті варіації конструктивних рішень і продукція компаній з виробництва болардів [5-7] позитивно зарекомендувала себе на європейському ринку. У той же час оглянуті рішення мають певні недоліки, найвагомійший з яких – велика вартість болардів згаданих компаній. Наведена інформація дозволила сформулювати мету і завдання справжнього дослідження.

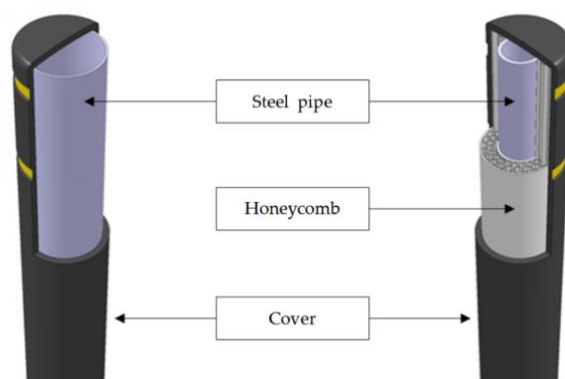


Рис. 4. Структура боларду зі стільниковим шаром

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є розроблення альтернативної системи безпеки пішоходів, пристосованої до умов м. Харкова.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

- розроблення системи безпеки пішоходів, що складається з окремих конструктивних елементів із можливістю комбінованого підходу їхнього застосування;

- конструювання надійних вузлів з'єднання елементів системи;
- чисельне тестування розробленої системи.

Основна частина досліджень. Задля виконання заданої мети в роботі запропоновано конструктивну систему безпеки пішоходів RS PSS, що складається з окремих складових (рис. 5). Перевага цієї системи – вона є комбінованою та може збиратися з окремих типорозмірів складових залежно від місця монтажу. Подібний варіант реалізації конструктиву пристосований до інфраструктурних потреб сучасних мегаполісів. Окрім можливості складання комбінацій з окремих елементів, позитивною особливістю такого підходу є те, що при виведенні з ладу одного з елементів системи його можна локально замінити. Система складається з таких елементів:

- болард RS RBL – визначення наведено вище;

- рефюдж RS RE – захисний залізобетонний елемент острівців безпеки на дорогах усіх типів у межах населених пунктів, що виготовляється з важкого залізобетону з ненапруженою арматурою.

Пішохідна плита RS BS – залізобетонний елемент, що покриває площу пішохідної зони острівця безпеки пішоходів і являє собою конструкцію для закріплення стримувальних елементів.

Система безпеки призначена для укладання на перехрестях автомобільних доріг, що мають острівець безпеки з регулятором руху, і в місцях улаштування пішохідних переходів.

Болард RS RBL являє собою прокатний профіль з безшовної гарячедеформованої труби з привареною до неї конструкцією фланцевого з'єднання з отворами під болти M8...M24, клас міцності 5, 6 (рис. 6). Верхній торець боларду закрито металевією накладкою. Матеріал прокату – Ст20.

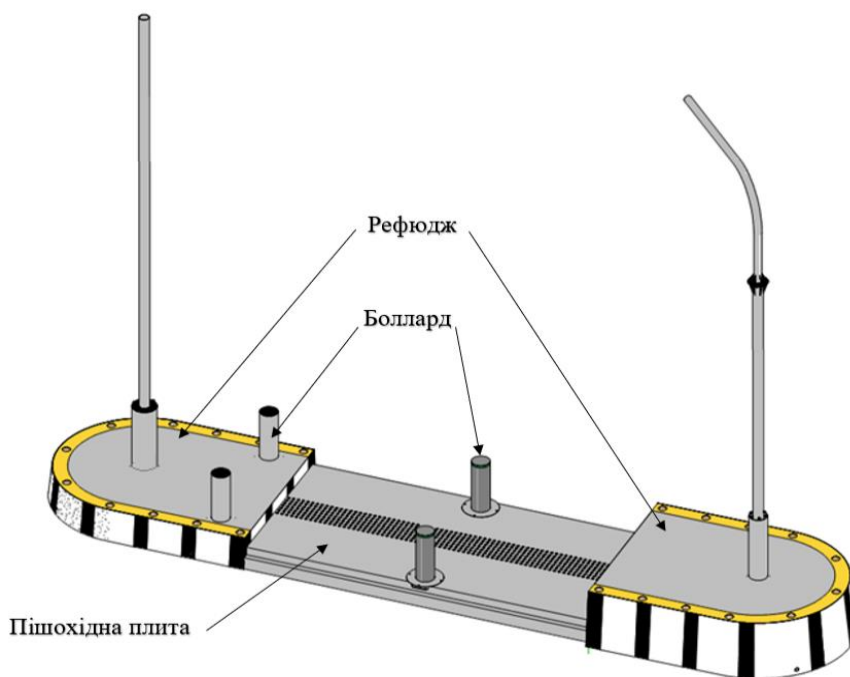


Рис. 5. Загальний вигляд системи безпеки пішоходів

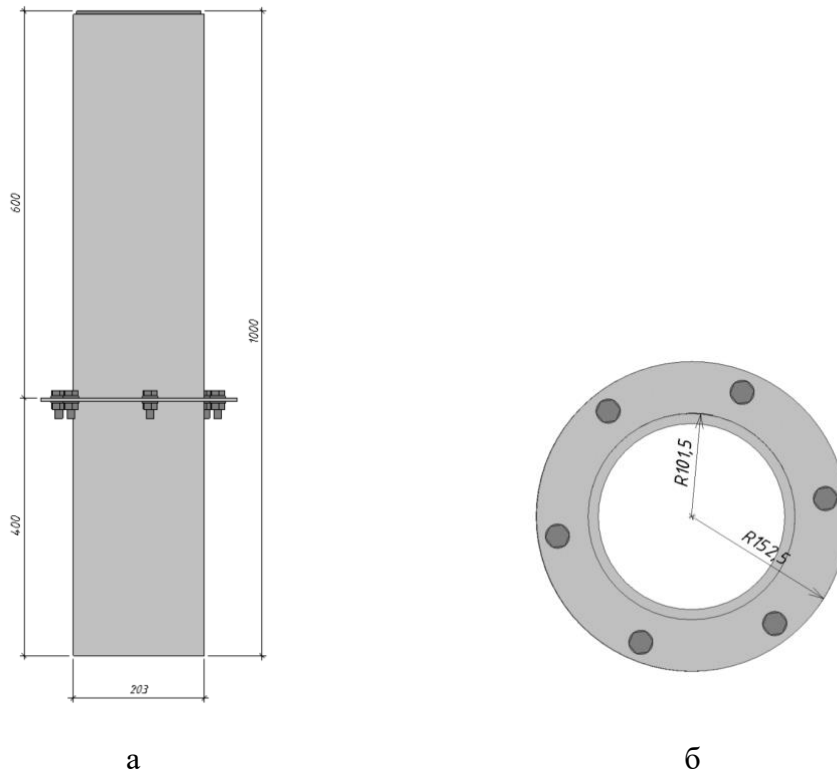


Рис. 6. Болард типу RS RBL 203.10.600.400: а – загальний вигляд; б – фланцеве з’єднання

Швидкісний режим руху автотранспортних засобів великих міст значно відрізняється – від паркінгу торговельних центрів, де боларди виконують суто обмежувальну рух функцію, до багатосмугових проспектів та естакад, де від несучої здатності боларду може залежати людське життя при виникненні дорожньо-транспортної

пригоди. Виходячи з аналізу інфраструктурних потреб сучасних мегаполісів розроблено чотири типорозміри болардів для різноманітності їх використання (табл. 1). Запропоновані конструкції болардів розрізняються діаметром, товщиною стінки, довжиною та несучою здатністю.

Таблиця 1

Типорозміри болардів

Номер	Найменування	Діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Надземна частина, мм	Підземна частина, мм	Момент опору, см ³	Підземна частина, мм
1	RS RBL 273.10.600.400	273	10	600	400	512.4	400
2	RS RBL 203.10.600.400	203	10	600	400	323.6	400
3	RS RBL 159.8.800.400	159	8	800	400	158.7	400
4	RS RBL 108.4.1000.400	108	4	1000	400	36.36	400

Рефюдж RS RE являє собою монолітний залізобетонний елемент із розмірами в плані 2580×2050 мм, з одного боку якого передбачено закруглення радіусом 1025 мм (рис. 7). Залежно від інтенсивності руху транспорту передбачено два типорозміри рефюджів за висотою. Основна ідея тут полягає в тому, що більші за висотою рефюджи передбачені для встановлення на перехрестях багатосмугових проспектів із великим трафіком автомобілів. За рахунок значного

виступу над дорожнім покриттям такий болард також являє собою протитаранний елемент і повністю або частково бере на себе удар від наїзду автомобіля. У рефюджи монтуються боларди діаметром 203 або 273 мм. Для кожного з рефюджів розраховано два типи армування відповідно до боларду, що буде використовуватись. Складові рефюджу: бетон класу С32/40, арматура класу А500С, сталеві закладні деталі (рис. 8). Технічні характеристики вказано в табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики і типорозміри рефюджів

Номер	Найменування	Висота, мм	Діаметр боларду, мм	Максимальний згинальний момент, кН×м	Витрати матеріалів		Маса плити, кг
					Бетон, м ³	Сталь, кг	
1	RS REF 400.273	400	273	214,6	1,81	293	4818
2	RS REF 400.203	400	203	132	1,83	166	4741
3	RS REF 400.273	700	273	214,6	3,31	349	8624
4	RS REF 700.203	700	203	132	3,33	195	8520

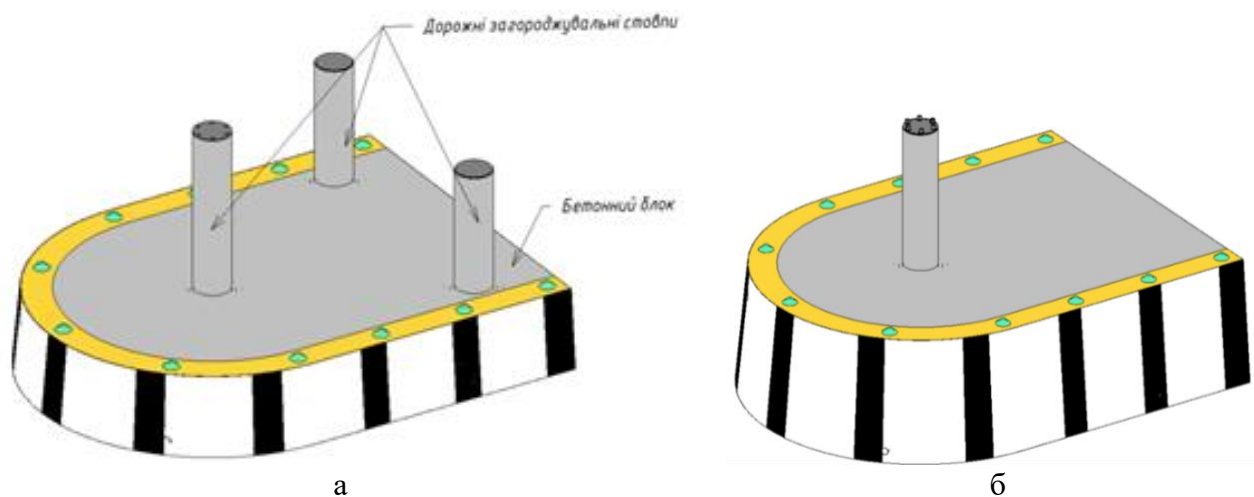


Рис. 7. Візуалізація системи болард-рефюдж:
а – RS REF 400; б – RS REF 700

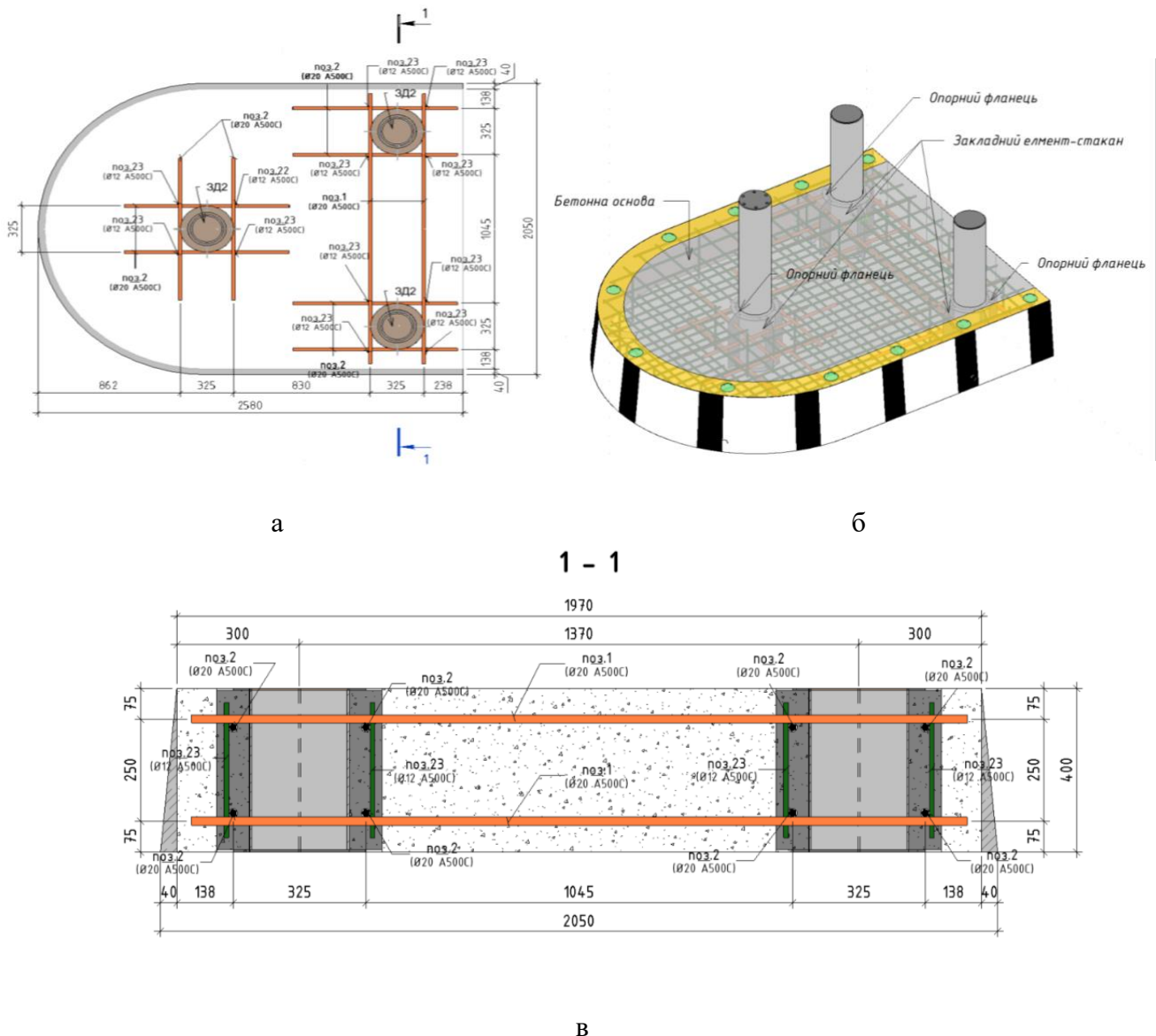


Рис. 8. Рефюдж RS RE у збірці з болардом RS RBL:
а – план; б – 3D-видгляд; в – розріз 1-1

Пішохідна плита RS BS призначена для встановлення безпосередньо на острівці безпеки між двома рефюджами RS RE (рис. 9). У цьому елементі також передбачено встановлення болардів RS RBL діаметром 203 мм. Окрім того, у пішохідну плиту RS BS встановлено тактильні елементи і спеціальне освітлення, що може бути скомутовано зі світлофором у разі такої потреби.

Плити виготовляються з важкого залізобетону з ненапруженою арматурою і містять у тілі плити сталеві рами з перфорованого двотавру (рис. 10). Складові плити: бетон класу C32/40; арматура класу A500C; профіль з прокатної сталі класу C235; закладні деталі виконані зі сталі C235. Пішохідні плити RS BS мають декілька типорозмірів (табл. 3).

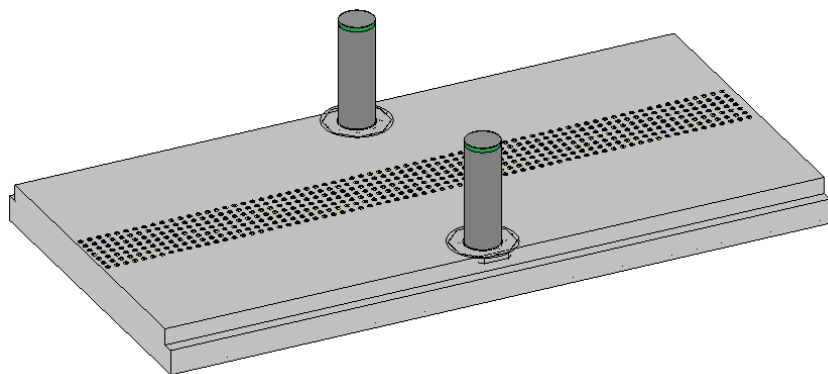


Рис. 9. 3D-вигляд пішохідної плити зі встановленими болардами

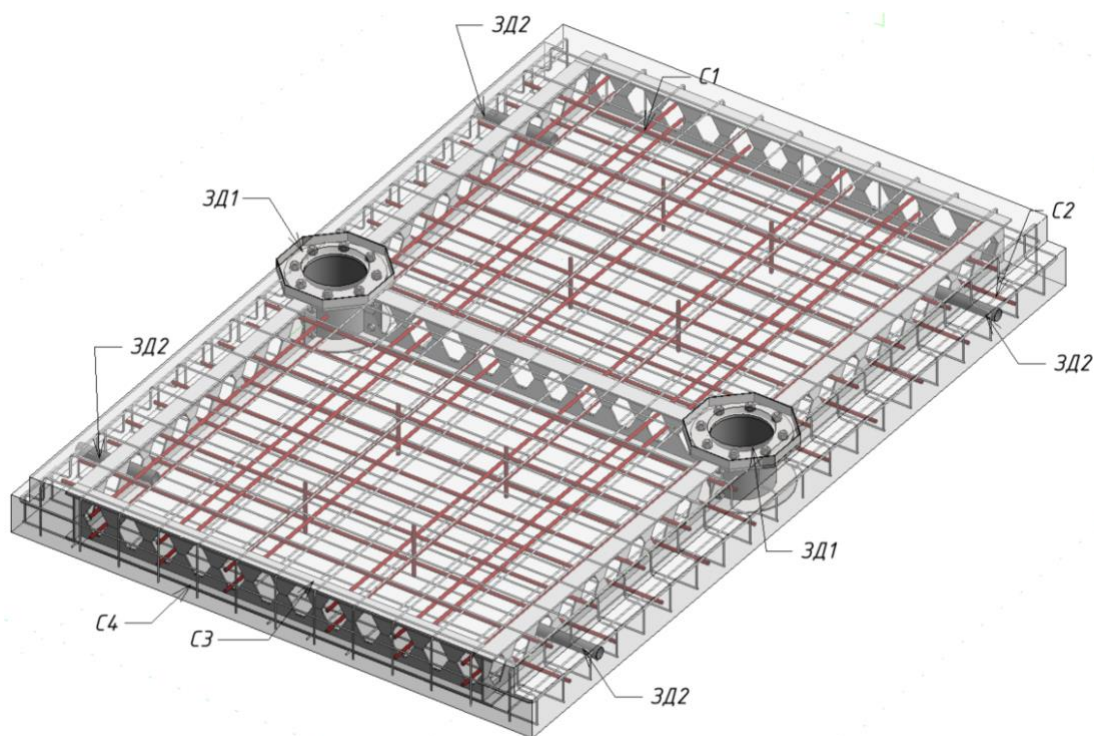


Рис. 10. 3D-вигляд конструктиву плити типу RS BS

Таблиця 3

Типорозмір і технічні характеристики плит

Номер	Найменування	Висота, мм	Довжина, мм	Діаметр стримувального елемента, мм	Ширина, мм	Максимальний згинальний момент, кН*м	Витрати матеріалів		Маса плити, кг
							Бетон, м ³	Сталь, кг	
1	BS 300.200.25	250	3000	203	2000	80	1,44	196,9	3806
2	BS 400.200.25	250	4000	203	2000	80	1,9	252,15	5002

Вузол кріплення боларду до рефюджу сконструйовано у збірному виконанні. Подібне рішення значною мірою підвищує практичність конструктиву в цілому, але в той же час потребує додаткових конструктивних заходів з підвищення надійності вузла, оскільки цей вузол є одним з найголовніших факторів

надійності конструкції в цілому. Кріплення болардів до рефюджу виконується через закладну деталь – металевий стакан (ЗД2 на рис. 8), замонолічений у тілі рефюджу. Стакан являє собою металеву прокатну трубу, внутрішній діаметр якої на 20 мм більший за діаметр боларду, що в неї встановлюється (рис. 11).

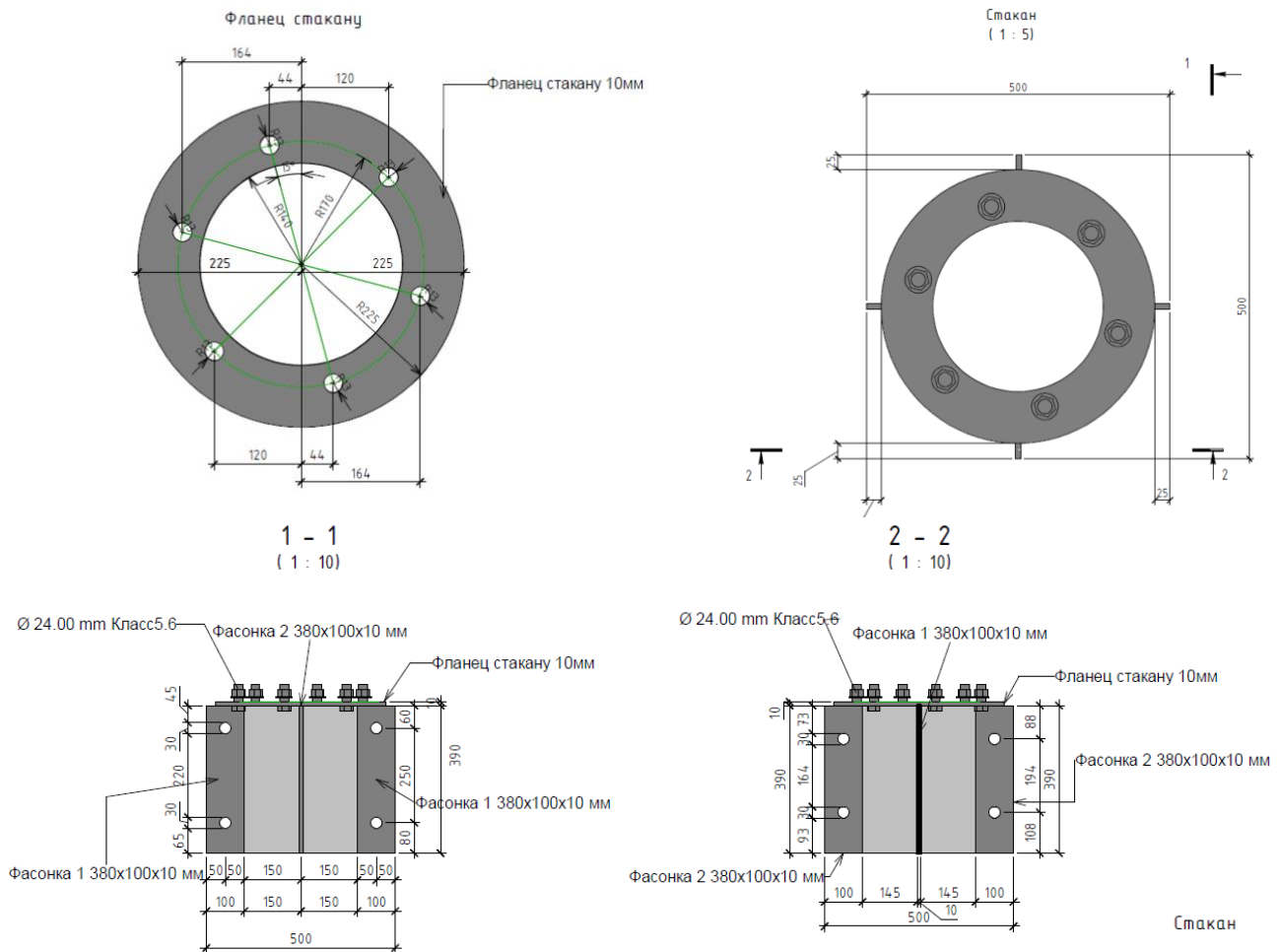


Рис. 11. Стакан у рефюджі типу RS REF 400.203

З чотирьох боків до труби приварені металеві фасонки, через кожен з яких проходить основна робоча арматура рефюджу (рис. 8). Фіксація боларду в стакані забезпечується шляхом заповнення простору між болардом і стаканом в'язучою сумішшю типу Ceresit. Зверху стакана передбачено фланцеве з'єднання, до якого болард додатково кріпиться болтами.

Стакан для пішохідних плит відрізняється від стакана рефюджу. Як несучий елемент, що тримає стакан у тілі плити, виступає металевий каркас з перфорованого двотавру. Він кріпиться до фасонки стакана високоміцними болтами (рис. 12). Така обставина зумовлена тим, що висота дорожньої плити менше за рефюдж, через що прокатної арматури стає недостатньо задля сприйняття критичного зовнішнього зусилля.

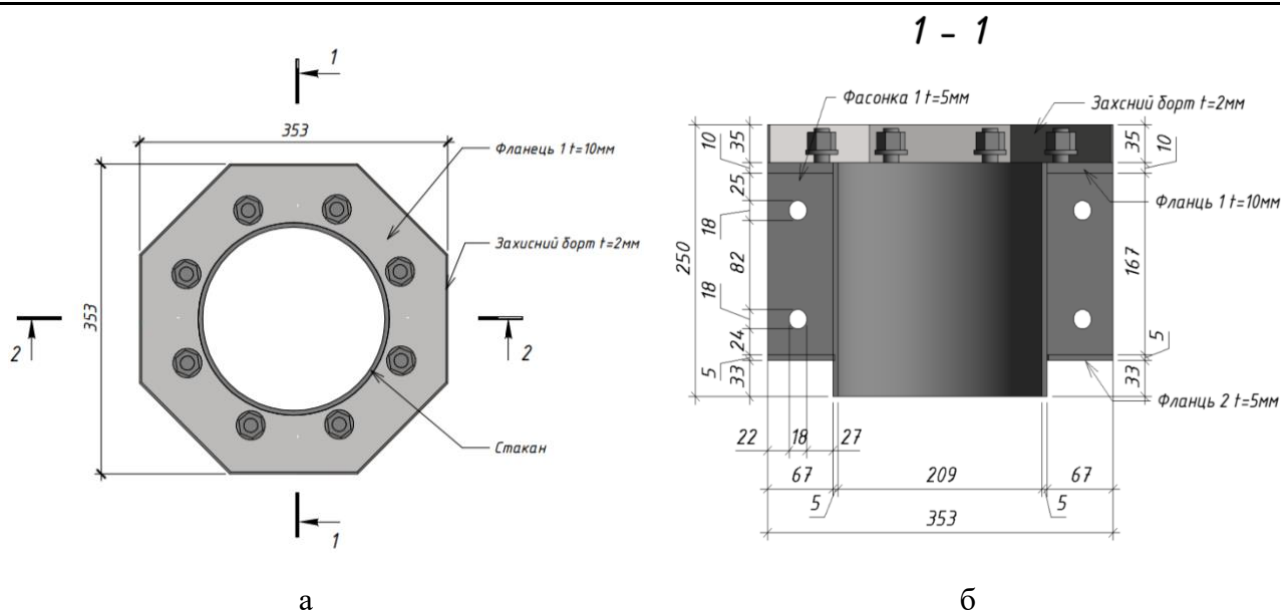


Рис. 12. Стакан у пішохідній плиті типу BS 300.200.25:

а – вигляд стакана зверху; б – розріз 1-1

Аналіз несучої здатності запропонованої системи. Розрахунок складено з метою визначення стримувальної здатності захисних споруд – болардів і складання рекомендацій щодо їх використання.

При визначенні граничної несучої здатності болардів були прийняті такі припущення:

1. Відповідно до табл. 4 ДСТУ Б В.2.3-13:2006 [13] максимальна висота прикладання навантаження до огорожувальних складає 0,53 м. У подальшому для запасу прийнято висоту прикладання навантаження до боларду на рівні 0,6 м незалежно від його висоти, у зв'язку з чим у розрахунках розглядалися чотири типорозміри болардів із різними діаметрами та товщинами стінок відповідно до табл. 5 і з однаковою висотою 600 мм.

2. Податливість вузла примикання боларду до рефюджу та віртуальні переміщення рефюджу як жорсткого тіла не враховувалися. Кріплення боларду в рефюджі, отже, прийнято абсолютно жорстким.

3. Для всіх варіантів розрахунку було прийнято припущення, що швидкість у момент удару об захисну конструкцію не змінюється, тобто вважається, що в момент

удару швидкість автомобілю не зростає і не зменшується.

4. Об'ємне тіло, що моделює рухомий транспорт, було прийнято у вигляді призми з розмірами 1000 × 1500 × 600 мм з ізотропного матеріалу. Об'ємна маса матеріалу призми підбиралася з умови дорівнювання загальної маси тіла відповідному необхідному транспортному засобу. Оскільки кузов автомобіля та інші елементи його підкапотного простору виконані з різних матеріалів і мають складну геометрію, прийнято для запасу, що поглинання кінетичної енергії за рахунок деформації рухомого транспорту не відбувається. Призма моделювалася як умовно абсолютно жорстке тіло з модулем пружності першого роду $E = 206$ ГПа.

5. У розрахунках розглядалися такі комбінації маси/швидкості рухомого транспорту.

- маси: 1500, 2500, 3500 кг;

- швидкості: 10, 20, 30, 50, 70, 90 км/год.

6. Вплив сили тяжіння для центра маси моделі в розрахунку враховується автоматично за допомогою відповідної функції розрахункового комплексу.

Скінчено-елементна модель створена в середовищі програмного комплексу Fusion 360. Сітка об'ємних скінчених елементів сгенерована з кроком 20 мм. Модель складається з трьох основних частин (рис. 13):

1. Об'ємний блок, що моделює частину плити (рефюджу), закріплену за

допомогою інструменту Structural constraints типу Fixed за нижню та бокові грані.

2. Об'ємний блок, що моделює автомобіль, n_f має розмір 1000 x 1500 x 600 мм.

3. Об'ємне тіло з параметрами та розмірами боларду, прийнятими відповідно до заданого типорозміру.

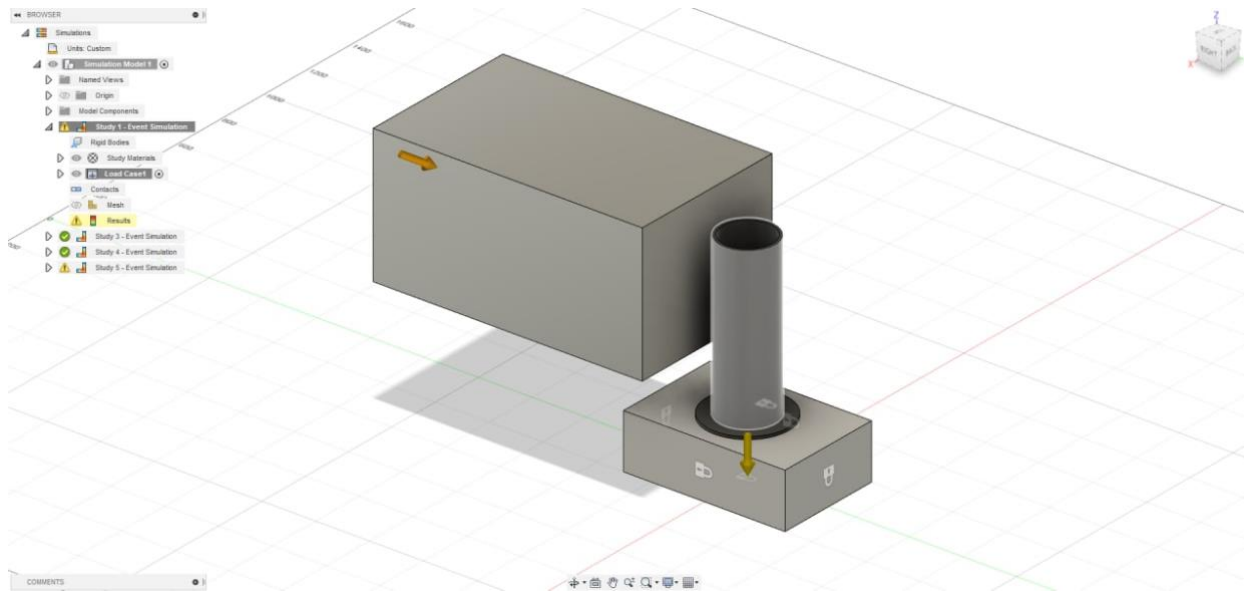


Рис. 13. Вигляд моделі в програмному комплексі

Навантаження в розрахунковій моделі створено за допомогою інструменту Initial linear velocity і прикладено до тіла 2. Тілу задавалась відповідна швидкість у напрям-

ку руху до тіла 3. Інтервал часу розрахунку для окремих варіантів задавався в діапазоні від 0,03 до 0,05 с. Інтенсивність створеного навантаження зображена на рис. 14.

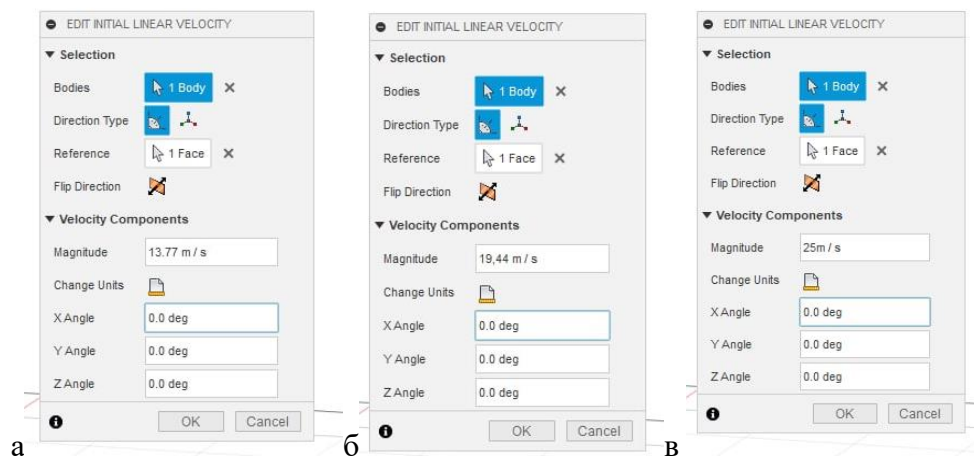


Рис. 14. Характеристики прикладеного навантаження зі швидкістю руху:
а – 50 км/год; б – 70 км/год; в – 90 км/год

Отже, розрахунок зведено до визначення спроможності/неспроможності певного типорозміру боларду сприйняти удар від наїзду рухомого транспорту певної маси з певною швидкістю. Аналіз результатів розрахунку проводиться за деформованою моделлю боларду і траєкторією руху тіла 2 після зіткнення з болардом. Виділено два можливих сценарії

стану боларду після наїзду рухомого транспорту:

1) болард деформувався (безповоротно або поворотно) і змінив траєкторію руху транспортного засобу на зворотний напрям (рис. 15);

2) болард деформувався поворотно та не змінив траєкторію руху транспортного засобу (рис. 16).

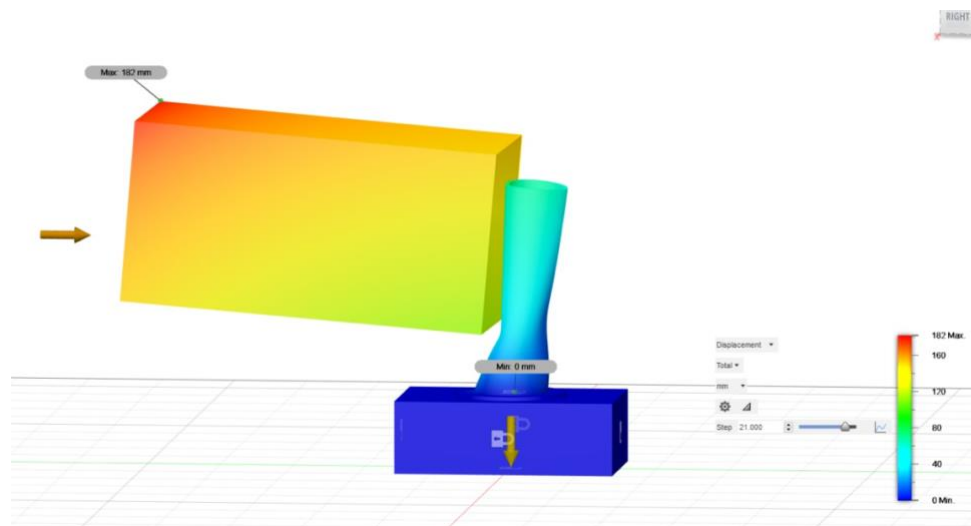


Рис. 15. Деформована модель після контакту в комбінації «1500/50» при розрахунку боларду «RS RBL 203»

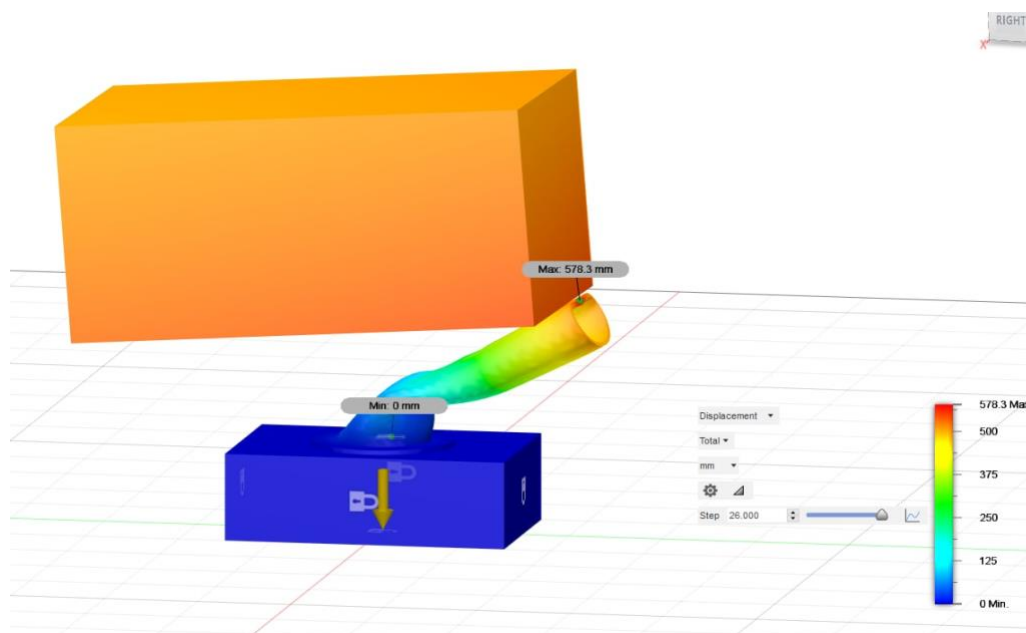


Рис. 16. Деформована модель після контакту в комбінації «3500/90» при розрахунку боларду «RS RBL 203»

Якщо відповідна комбінація маса/швидкість не відповідала успішному результату виконання захисної функції, то всі інші комбінації з більшою швидкістю при такій масі вважаються навантаженням, що перевищує несучу здатність. Так само оцінюється несуча здатність для поворотних варіантів, коли несуча здатність достатня.

Описана процедура розрахунку здійснена для всіх типорозмірів болардів і

комбінацій швидкість/маса транспортного засобу. Кінцеві результати розрахунку подано в табл. 4, у якій прийнято такі позначення: ✓ – болард деформувався (поворотно або безповоротно), при цьому запобіг наїзду транспортного засобу на зону розташування пішоходів; ✗ – болард деформувався безповоротно та не запобіг наїзду транспортного засобу на зону розташування пішоходів.

Таблиця 4

Несуча здатність болардів

Діаметр боларду		Маса, кг											
		1500				2500				3500			
		108	159	203	273	108	159	203	273	108	159	203	273
Швидкість, км/год	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	50	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
	70	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓
	90	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Із наведених результатів розрахунку випливає, що боларди діаметром 203 та 273 мм здатні витримати наїзд легкового автомобіля та середнього позашляховика зі швидкісним режимом, дозволеним у межах міста. У той же час боларди діаметром 108 та 159 мм не рекомендується для застосування на автомобільних дорогах із обмеженням швидкості до 50 км/год.

Висновки. Аналіз світової практики проектування систем безпеки пішоходів виявив певні недоліки відомих

конструктивних рішень. Ця обставина зумовила доцільність розроблення альтернативної системи RS XXX, що повною мірою відповідає інфраструктурним потребам сучасних міст. За результатами аналізу напружено-деформованого стану складових систем можна зробити висновок, що боларди RS RBL діаметром 203 та 273 мм придатні для застосування на всіх типах автомобільних доріг у межах міста.

Список використаних джерел

1. Оpendatabot: За 10 місяців кількість ДТП в Україні збільшилася на 14 %. URL: <https://opendatabot.ua/analytics/dtp-2021> (дата звернення: 30.09.2022).
2. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів: затв. Мінрегіоном України 24.04.2018 р. Київ: Мінрегіон України, 2018. 61 с.
3. ДСТУ 8751:2017. Безпека дорожнього руху. Огородження дорожні і напрямні пристрої. Правила використання. Загальні технічні вимоги. Київ, 2019. 44 с.

4. Verkehrsunfälle 2021: Weniger Getötete, mehr Schwerverletzte. URL: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/dokumentation/medienmitteilungen/anzeige-meldungen.msg-id-87635.html> (дата звернення:30.09.2022).
5. Anlagen für den leichten Zweiradverkehr des Kantons Zürich. URL: <https://docplayer.org/46766481-Anlagen-fuer-den-leichten-zweiradverkehr-des-kantons-zuerich.html> (дата звернення:30.09.2022).
6. Kanton Zürich Volkswirtschaftsdirektion Amt für Verkehr Ausbaustandard für Staatsstrassen Leitfaden für die Projektierung Version. URL: <https://docplayer.org/111492357-Kanton-zuerich-volkswirtschaftsdirektion-amt-fuer-verkehr-ausbaustandard-fuer-staatsstrassen-leitfaden-fuer-die-projektierung-version.html> (дата звернення:30.09.2022).
7. Seon S., Kim K., Bae C., Yi W. A Study on Shock Absorption Characteristics of Honeycomb-Inserted Bollards. *Appl. Sci.* 2020. 10. 3014. URL: <https://doi.org/10.3390/app10093014>.
8. Field Tests and Numerical Modeling of Vehicle Impacts on a Boulder Embedded in Compacted Fil / Reese L et. al. *International Journal of Protective Structures.* 2014. Vol. 5. No 4. P. 435-451.
9. Bo Hu. An assessment of current maximum impact force models for anti-ram bollard systems subjected to truck impact. *International Journal of Protective Structures.* 2017. Vol. 8(3). P. 368–383.
10. A Study on Shock Absorption Bollard using Honeycomb Geometry / Seon S.W. et. al. *Korean Soc. Precis. Eng.* 2018. № 1. P. 531.
11. Cha E. H., Jeon D. J., Han S. E. Performance Evaluation and Proposal on Standard Establishment of the Bollard through Impact Analysis. *J. Korean Assoc. Spat. Struct.* 2016. P. 59-66.
12. Design Analysis of Hybrid Composite Anti-ram Bollard Subjected to Impulsive Loadings. / Tran J.P. et al. *Compos. Struct.* 2018. P. 568-613.
13. ДСТУ Б В.2.3-13:2006. Споруди транспорту. Огородження дорожні першої групи. Порядок проведення натурних випробувань. Київ, 2006. 23 с.

Калмиков Олег Александрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0001-7294-4279. Тел.: +38(067)9929427. E-mail: olegkalmikov010@gmail.com.

Захаров Денис Сергійович, кандидат технічних наук, директор ТОВ «РС ІНЖЕНЕРІНГ». ORCID ID: 0000-0002-8275-9939. Тел.: +38(050)3177737. E-mail: zakharov.denys.mail@gmail.com.

Грибенюк Сергій Миколайович, здобувач кафедри будівельних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-9699-9116. Тел.: +38(099)0301663. E-mail: gribenuks@gmail.com.

Алатаєв Джамалдій Аслудійович, здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0003-1570-8469. Тел.: +38(097)1398944. E-mail: alataev123@gmail.com.

Kalmykov Oleg, PhD (Tech), Associate Professor, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0001-7294-4279. Tel.: +38(067)9929427. E-mail: olegkalmikov010@gmail.com.

Zakharov Denys, PhD (Tech), director of «RS ENGINEERING» LLC. ORCID ID: 0000-0002-8275-9939. Tel.: +38(050)3177737. E-mail: zakharov.denys.mail@gmail.com.

Serhiy Hrybenyuk, applicant, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-9699-9116. Tel.: +38(099)0301663. E-mail: gribenuks@gmail.com.

Alataev Dzhamaiddii, master student, Building Structures department, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0003-1570-8469. Tel.: +38(097)1398944. E-mail: alataev123@gmail.com.

Статтю прийнято 04.12.2022 р.

СТАТТІ ОГЛЯДОВО-ДИСКУСІЙНОГО ХАРАКТЕРУ

УДК 528.4:332.3

**ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ЧИННИКІВ ФОРМУВАННЯ МОНІТОРИНГУ
ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ ОБ'ЄДНАНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД**

Асп. О. М. Канівець

**FORECASTING CHANGES IN FACTORS FORMING LAND USE MONITORING
OF UNITED TERRITORIAL COMMUNITIES**

Postgraduate student Olena Kanivets

***Анотація.** Доведено, що формування напрямів використання земель об'єднаних територіальних громад залежить від застосування сучасних моніторингових процедур. Вони визначають зміни чинників, що впливають на використання земель об'єднаних територіальних громад і створюють умови для формування просторового, містобудівного, соціально-економічного та екологічного забезпечення. Визначена необхідність прогнозування зміни чинників використання земель об'єднаних територіальних громад і встановлення їхнього впливу на валовий регіональний продукт на одиницю площі.*

Здійснено прогнозування змін чинників використання земель об'єднаних територіальних громад і їхній вплив на узагальнюючі показники територіального розвитку регіонів.

Застосування математичної моделі на основі використання кореляційно-регресійного аналізу дало змогу встановити зв'язок між чинниками використання земель об'єднаних територіальних громад і показником валового регіонального продукту на одиницю площі та забезпечити прогнозування регіонального розвитку для розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо формування та реалізації моніторингу використання земель об'єднаних територіальних громад.

***Ключові слова:** просторові, містобудівні, соціально-економічні, екологічні чинники, об'єднані територіальні громади.*

***Abstract.** territorial communities depends on the application of modern monitoring procedures. They determine the changes in factors affecting the use of land of united territorial communities and create conditions for the formation of spatial, urban planning, socio-economic and environmental support. The necessity of forecasting changes in land use factors of united territorial communities and establishing their impact on the gross regional product per unit of area has been determined.*

The purpose of the study is to determine forecast changes in land use factors of united territorial communities. To achieve the set goal, the following tasks were completed:

– determination of the toolkit of influencing factors of formation and land use of united territorial communities;

– description of practical aspects of forecasting changes in factors of formation and land use of united territorial communities.

It has been proven that the gross regional product per unit area is a generalizing indicator that characterizes the territorial development of regions. A numerical experiment was conducted to predict the determined value of the change in the gross regional product per unit area in accordance with the regression model with an increase of each generalizing indicator by 10% and a corresponding increase in the set of group indicators by 10%.

It was determined that urban planning indicators of land use of united territorial communities have the greatest influence on the indicator of gross regional product per unit area. At the same time, the development and implementation of scientifically based recommendations on increasing the efficiency of land use of united territorial communities through the prism of spatial, urban planning, socio-economic, and environmental factors on the basis of monitoring procedures is of great importance.

It was established that the growth of the regional product per unit area is due to the increase in the integral indicator of land use of the united territorial communities by region of Ukraine. In the context of ensuring the development of regions, increasing the efficiency of land use of united territorial communities is of great importance. This process is implemented on the basis of the development and application of monitoring tools, the basis of which are the results of the assessment of the integral indicator of land use, its mathematical modeling and the formation of geoinformation support.

Forecasting of changes in land use factors of united territorial communities and their impact on generalizing indicators of territorial development of regions has been carried out.

The application of a mathematical model based on the use of correlation-regression analysis made it possible to establish a relationship between the factors of land use of united territorial communities and the indicator of gross regional product per unit area, which made it possible to provide forecasting of regional development for the development of scientifically based recommendations for the formation and implementation of monitoring land use of united territorial communities.

Keywords: *spatial, urban planning, socio-economic, ecological factors, united territorial communities.*

Вступ. Формування напрямів використання земель об'єднаних територіальних громад (ОТГ) залежить від застосування сучасних моніторингових процедур. Вони визначають зміни чинників, що впливають на використання земель ОТГ і створюють умови для формування просторового, містобудівного, соціально-економічного та екологічного забезпечення. Крім того, такі процеси залежить від створеної кількісної основи шляхом застосування математичного інструментарію. Особливе значення мають процеси визначення змін чинників використання земель ОТГ у прогностичних періодах для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Отже, тема дослідження є актуальною, а її розроблення має своєчасний характер.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напрями формування земельних відносин і застосування сучасного інструментарію подано в роботах [1–11].

Разом з тим залишаються невирішеними питання формування та використання земель об'єднаних територіальних громад шляхом застосування моніторингових процедур, створення кількісної основи з використанням математичного інструментарію.

Слід зазначити, що фокус уваги дослідників зосереджено на визначенні моніторингу земель. Зокрема, він характеризується як постійне спостереження за станом природних,

технічних і соціальних процесів для забезпечення оцінювання, контролю та прогнозування [12]. На організаційно-правових напрямках щодо визначення моніторингу використання земель зосереджено увагу в роботі [13].

Стейкхолдерні відносини виокремлюються в системі формування та використання моніторингу земель шляхом визначення повноваження суб'єктів і їхніх обов'язків:

- виконувати проекти зі збереження, відтворення та охорони родючості ґрунтів;

- відігравати провідну роль у просвітницько-виховній ґрунтоохоронній роботі;

- зупиняти виробництво промислової продукції, використовуваної в агротехнологіях, бо вона призводить до погіршення властивостей і родючості ґрунтів;

- виводити з риллі малопродуктивні й деградовані землі, якщо це підтверджено відповідними даними;

- отримувати матеріали інших міністерств і відомств про охорону ґрунтів, копії матеріалів ґрунтових обстежень, незалежно від того, за чиєї ініціативи і чийм коштом їх виконували;

- підвищити вимоги до перевірки стану рекультивованих земель, що повертаються до земель сільськогосподарського призначення після гірничо-видобувних робіт і біологічного етапу рекультивації [10].

Функціональні особливості моніторингу використання земель визначаються через напрями його формування та реалізації:

- своєчасне виявлення зміни стану земель і властивостей ґрунтів;

- оцінювання здійснення заходів щодо охорони земель;

- збереження та відтворення родючості ґрунтів;

- попередження впливу негативних процесів і ліквідації наслідків цього впливу [11].

У системі здійснення моніторингових процедур визначаються компоненти

інформаційного забезпечення наземного моніторингу земель:

- показники бонітету ґрунту;

- показники експертного оцінювання земель;

- показники стану посівів;

- інформація про біологічний потенціал земель;

- дані про агрохімічні зміни ґрунту;

- вплив соціально-економічних змін на розвиток земельних відносин;

- інформація про трудові, матеріально-технічні, інвестиційні,

інноваційні ресурси в різних категоріях господарств;

- дистанційний моніторинг земель;

- результати авіаційного зондування землі з зазначенням географічних координат земельних ділянок;

- показники просторових агрометеорологічних спостережень;

- показники екологічних норм;

- модернізація старих і формування нових топографічних карт;

- оновлення цифрової інформації щодо сільськогосподарського освоєння території;

- земельних відносин;

- зміни в реєстрі прав на нерухоме майно, розміщене на земельних ділянках, та угод із ним;

- спостереження за динамікою укладання орендних договорів з градацією за терміном використання;

- дані про посівні площі сільськогосподарських культур і площі багаторічних насаджень;

- моніторинг кількості землевласників і землекористувачів, які отримали Державний акт на право приватної власності на землю, і норми земельних площ для рентабельного господарювання за категоріями господарств різних природно-кліматичних зон;

- контролювання цільового використання сільськогосподарських угідь;

– визначення доступу до ділянок власників-господарів, дані про земельні частки, що з ними межують [14].

Отже, враховуючи дискусійність наведених наукових положень, тема дослідження є актуальною і має важливе теоретико-методичне значення для формування земельних відносин об'єднаних територіальних громад.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення прогностичних змін чинників використання земель об'єднаних територіальних громад. Для досягнення поставленої мети виконано такі завдання:

– визначення інструментарію впливу чинників формування та використання земель ОТГ;

– характеристика практичних аспектів прогнозування змін чинників формування та використання земель об'єднаних територіальних громад.

Основна частина дослідження. Узагальнюючим показником, що характеризує територіальний розвиток регіонів, є валовий регіональний продукт на одиницю площі.

Для створення кількісної основи формування моніторингу використання земель об'єднаних територіальних громад запропоновано здійснити математичне моделювання впливу чинників на інтегральний показник. Математичне моделювання реалізується через призму відповідних етапів:

1. Формування інформаційно-аналітичного забезпечення щодо чинників та інтегрального показника використання земель об'єднаних територіальних громад за регіонами.

2. Застосування методів математичного моделювання відносно встановлення впливу чинників на інтегральний показник.

3. Розроблення математичних моделей впливу чинників на інтегральний показник використання земель ОТГ.

4. Визначення критеріїв адекватності математичних моделей.

5. Інтерпретація отриманих результатів.

Математичне моделювання інтегрального чинника використання земель об'єднаних територіальних громад і показник зміни валового регіонального продукту на одиницю площі ОТГ у регіонах України здійснюється за критеріями, отриманими на основі результатів оцінювання узагальнюючих просторових, містобудівних, соціально-економічних, екологічних чинників та інтегрального показника. Головним завданням математичного моделювання в рамках поставленої задачі є визначення впливу кожного з узагальнюючих чинників використання земель об'єднаних територіальних громад та інтегрального показника на результати діяльності ОТГ, визначеної в динаміці зміни валового регіонального продукту на одиницю площі на регіональному рівні з метою розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо моніторингу використання земель.

Математичне моделювання узагальнюючих чинників використання земель об'єднаних територіальних громад на регіональному рівні здійснюється на основі запропонованих етапів.

Показник зміни валового регіонального продукту на одиницю площі ОТГ подано на рис. 1.

Кореляційно-регресійний аналіз чинника валового регіонального продукту на одиницю площі відповідного регіону проведено у два етапи: по всіх регіонах України та з виключенням виявлених дивіаційних значень показників за двома схемами – побудовано регресійні моделі залежності чинника зміни валового регіонального продукту від інтегрального показника використання земель об'єднаних територіальних громад і залежності зміни валового регіонального продукту від узагальнюючих чинників використання земель об'єднаних територіальних громад.

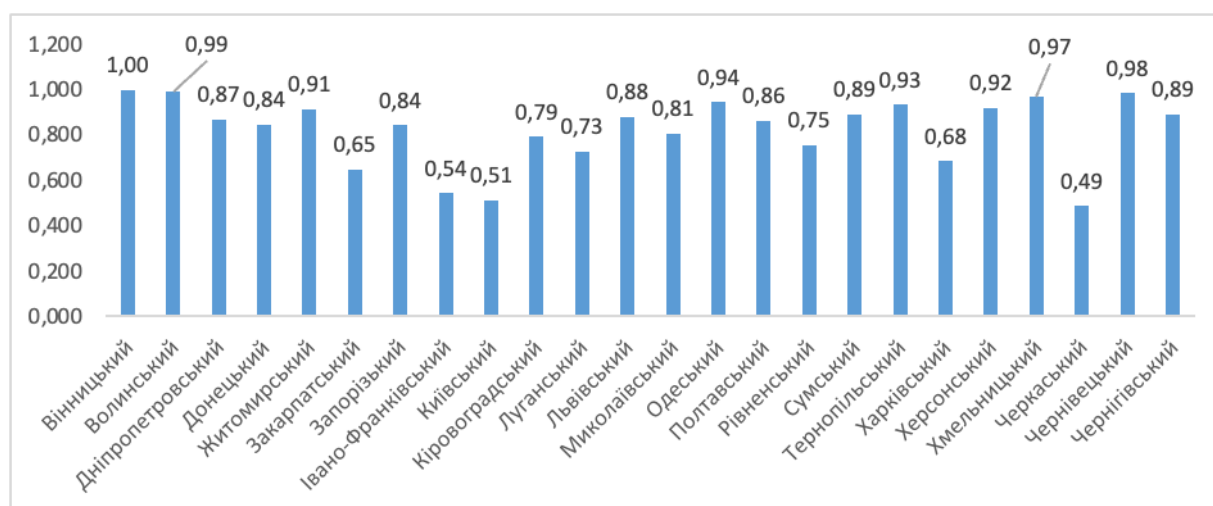


Рис. 1. Показник зміни валового регіонального продукту на одиницю площі об'єднаних територіальних громад, відн. од. (розроблено автором)

Результати першого етапу числового експерименту зі знаходження параметрів лінійної регресії для індексу валового регіонального продукту залежно від інтегрального показника використання земель ОТГ та множинної регресії для

чинника валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від узагальнюючих показників використання земель об'єднаних територіальних громад подано в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Кореляційно-регресійний аналіз впливу інтегрального показника використання земель об'єднаних територіальних громад на чинник валового регіонального продукту на одиницю площі, відн. од. (розроблено автором)

Показник (коефіцієнт множинної регресії)	Розраховане значення показника
b_0	0,501891
b_{yx}	0,515663
R_{xy}	0,620573

Таблиця 2

Кореляційно-регресійний аналіз впливу узагальнюючих показників використання земель об'єднаних територіальних громад на чинник валового регіонального продукту на одиницю площі, відн. од. (розроблено автором)

Показник (коефіцієнт множинної регресії)	Розраховане значення показника
b_0	-1,4493
b_{yx_1}	0,0511
b_{yx_2}	0,6552
b_{yx_3}	-0,0261
b_{yx_4}	0,0113
R_{xy}	0,8895

Математична модель, що відтворює вплив інтегрального показника рівня моніторингу використання земель об'єднаних територіальних громад на індекс валового регіонального продукту, визначений на одиницю площі, має вигляд

$$y_x = 0,516 \cdot x + 0,502. \quad (1)$$

Математична модель, за якою встановлено залежність чинника валового регіонального продукту на одиницю площі від узагальнюючих показників використання земель ОТГ, набуває вигляду

$$y_x = 0,051 \cdot x_1 + 0,655 \cdot x_2 - 0,026 \cdot x_3 + 0,011 \cdot x_4 - 1,449. \quad (2)$$

Порівняння побудованих регресійних моделей призводить до висновків, що для поліпшення якості моделі слід брати до уваги всі узагальнюючі чинники, які впливають на результат. Порівняння коефіцієнтів кореляції 0,8895 (для множинної регресії) і 0,6206 (для лінійної регресії) свідчить, що спільний вплив узагальнюючих чинників використання земель ОТГ на 88,9 % обумовлює зміни показника валового регіонального продукту на одиницю площі регіонів. Окремий вплив кожного з узагальнюючих чинників зменшує їхні значення в контексті формування валового регіонального продукту на одиницю площі.

Аналіз коефіцієнтів множинної регресії дозволяє стверджувати, що на чинник зміни валового регіонального продукту на одиницю площі найбільший вплив має група містобудівних показників використання земель об'єднаних територіальних громад. Негативний вплив на показник зміни валового регіонального продукту на одиницю площі виявився у групи соціально-економічних показників, що вказує на їхній зворотний вплив. Серед інших причин такої ситуації можна виділити найбільшу статистичну узгодженість містобудівних показників і найменшу статистичну узгодженість соціально-економічних показників чинника використання земель об'єднаних територіальних громад за регіонами України.

Проведено числовий експеримент з прогнозування визначеного значення зміни валового регіонального продукту на одиницю площі відповідно до регресійної моделі при збільшенні кожного узагальнюючого показника на 10 % і зростання сукупності групових показників на 10 % (табл. 3).

У результаті дослідження встановлено, що збільшення на 10 % просторових чинників призводить до збільшення чинника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі в середньому на 2,4 % за регіонами України; відповідне збільшення містобудівних показників передбачає зростання показника валового регіонального продукту на 20,4 %; зміна екологічних показників на 10 % призводить до збільшення узагальнюючого чинника регіонального розвитку на 0,5 %. Отже, найбільший вплив на показник валового регіонального продукту на одиницю площі мають містобудівні показники використання земель об'єднаних територіальних громад. При цьому важливого значення має розроблення та реалізація науково обґрунтованих рекомендацій щодо зростання ефективності використання земель ОТГ через призму просторових, містобудівних, соціально-економічних, екологічних чинників на основі здійснення моніторингових процедур.

Наочна ілюстрація побудованої регресійної моделі подана на рис. 2.

Таблиця 3

Регресійне моделювання зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від зміни узагальнюючих показників використання земель об'єднаних територіальних громад на 10 %, відн. од.

Регіон	Значення показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі за заданими параметрами моделі	Значення показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі при збільшенні на 10 %				
		просторових чинників	містобудівних чинників	соціально-економічних чинників	екологічних чинників	усіх чотирьох груп чинників
Вінницький	0,927	0,952	1,146	0,916	0,932	1,165
Волинський	0,855	0,880	1,065	0,845	0,859	1,085
Дніпропетровський	0,870	0,892	1,083	0,860	0,875	1,102
Донецький	0,841	0,862	1,052	0,832	0,846	1,070
Житомирський	0,890	0,916	1,103	0,880	0,896	1,124
Закарпатський	0,651	0,672	0,846	0,643	0,654	0,861
Запорізький	0,781	0,806	0,982	0,773	0,787	1,004
Івано-Франківський	0,590	0,616	0,772	0,583	0,595	0,794
Київський	0,648	0,673	0,839	0,637	0,651	0,857
Кіровоградський	0,764	0,784	0,968	0,754	0,768	0,985
Луганський	0,655	0,678	0,847	0,647	0,659	0,866
Львівський	0,838	0,863	1,046	0,830	0,843	1,067
Миколаївський	0,849	0,875	1,062	0,836	0,854	1,079
Одеський	0,833	0,857	1,042	0,824	0,837	1,061
Полтавський	0,803	0,826	1,007	0,794	0,809	1,028
Рівненський	0,814	0,839	1,017	0,806	0,819	1,040
Сумський	0,783	0,808	0,988	0,770	0,787	1,006
Тернопільський	0,887	0,913	1,099	0,878	0,892	1,121
Харківський	0,736	0,761	0,935	0,728	0,740	0,955
Херсонський	0,875	0,901	1,090	0,862	0,880	1,108
Хмельницький	0,871	0,895	1,081	0,862	0,876	1,103
Черкаський	0,346	0,371	0,505	0,338	0,348	0,525
Чернівецький	0,899	0,923	1,114	0,891	0,905	1,134
Чернігівський	0,910	0,935	1,126	0,900	0,914	1,146



Рис. 2. Прогнозування зміни валового регіонального продукту на одиницю площі від зміни узагальнюючих показників використання земель об'єднаних територіальних громад на 10 %, відн. од.

Результати регресійного моделювання зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від зміни інтегрального показника використання земель об'єднаних територіальних громад подано в табл. 4.

У результаті дослідження визначено, що зростання регіонального продукту на одиницю площі обумовлено збільшенням інтегрального показника використання земель об'єднаних територіальних громад

за регіонами України. У контексті забезпечення розвитку регіонів важливого значення має зростання ефективності використання земель ОТГ. Цей процес реалізується на підставі розроблення та застосування моніторингового інструментарію, основою якого є результати оцінювання інтегрального показника використання земель, його математичне моделювання й формування геоінформаційного забезпечення.

Таблиця 4

Регресійне моделювання зміни валового регіонального продукту на одиницю площі залежно від зміни інтегрального показника використання земель об'єднаних територіальних громад, відн. од.

Регіон	Значення показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі за заданими параметрами моделі	Значення показника зміни валового регіонального продукту на одиницю площі при збільшенні			
		на 5 %	на 10 %	на 15 %	на 20 %
Вінницький	0,896	0,916	0,936	0,955	0,975
Волинський	0,858	0,876	0,894	0,912	0,930
Дніпропетровський	0,821	0,837	0,853	0,869	0,885
Донецький	0,762	0,775	0,788	0,801	0,814
Житомирський	0,931	0,953	0,974	0,996	1,017
Закарпатський	0,582	0,586	0,590	0,594	0,598
Запорізький	0,846	0,863	0,880	0,898	0,915
Івано-Франківський	0,761	0,774	0,787	0,800	0,813
Київський	0,802	0,817	0,832	0,847	0,862
Кіровоградський	0,718	0,729	0,740	0,750	0,761
Луганський	0,711	0,721	0,732	0,742	0,753
Львівський	0,819	0,835	0,851	0,867	0,883
Миколаївський	0,955	0,978	1,000	1,023	1,046
Одеський	0,771	0,785	0,798	0,812	0,825
Полтавський	0,848	0,866	0,883	0,900	0,918
Рівненський	0,844	0,861	0,879	0,896	0,913
Сумський	0,928	0,949	0,971	0,992	1,013
Тернопільський	0,872	0,890	0,909	0,927	0,946
Харківський	0,768	0,782	0,795	0,808	0,822
Херсонський	0,972	0,996	1,019	1,043	1,066
Хмельницький	0,850	0,867	0,884	0,902	0,919
Черкаський	0,652	0,659	0,667	0,674	0,682
Чернівецький	0,843	0,860	0,877	0,894	0,911
Чернігівський	0,862	0,880	0,898	0,916	0,934

Висновки. Запропоновано інструментарій математичного моделювання впливу чинників формування та використання земель ОТГ, що дозволив сформулювати кількісне підґрунтя для прийняття рішень

щодо управління земельними відносинами та здійснення їхнього моніторингу.

Здійснено прогнозування змін чинників використання земель об'єднаних територіальних громад і їхній вплив на

узагальнюючі показники територіального розвитку регіонів.

Застосування математичної моделі на основі використання кореляційно-регресійного аналізу дало змогу встановити зв'язок між чинниками використання земель об'єднаних територіальних громад і

показником валового регіонального продукту на одиницю площі, що дозволило забезпечити прогнозування регіонального розвитку для розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо формування та реалізації моніторингу використання земель ОТГ.

Список використаних джерел

1. Горланчук В. В., В'юн В. Г., Песчанська І. М. Управління земельними ресурсами: підручник. Львів: Видавництво «Магнолія Плюс», 2006. 443 с.
2. Дорош Й. М. Прогнозування розвитку земельних відносин залежно від зміни структури регіонального землекористування. Дніпропетровськ, 2011. URL: <http://economy.nauka.com.ua/index.php?operation=1&iid=817> (дата звернення: 18.09.2022).
3. Мамонов К. А., Штерндок Е. С. Методи і моделі оцінки формування, розподілу та використання земель мегаполісу, що застосовуються у системі геоінформаційного забезпечення. *Економічна кібернетика: аспекти становлення і розвитку електронної економіки: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. (Дніпро, 1-2 березня 2017 р.)*. Дніпро: Пороги, 2017. С. 92–96.
4. Палеха Ю. Н., Олещенко А. В., Соломаха І. В. Применение ГИС-технологий в градостроительных проектах на государственном и региональном уровнях. *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. География*. 2012. № 1. С. 155–166.
5. Казаченко Л. М., Казаченко Д. А. ГИС-технології при виявленні деградаційних процесів ґрунтового покриву лісостепової частини Харківської області. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2015. № 156. С. 231–236.
6. Мамонов К., Корнієць А. Застосування геоінформаційних систем для моніторингу використання земель міст. *Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrese-2017» (14-16 грудня 2017 р.)*: збірник матеріалів. Львів: Видавництво Львівської політехники, 2017. С. 216–218.
7. Мамонов К. А., Нестеренко С. Г., Вяткін К. І. ГИС-забезпечення у раціональному використанні земельних ресурсів міської забудови. *Науковий вісник будівництва. Харківський національний університет будівництва та архітектури*. Харків, 2016. Т. 86. № 4. С. 323.
8. Мамонов К. А. Застосування ВЕБ геоінформаційних систем для розподілу та використання земель. *Комунальне господарство міст. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Серія: Технічні науки та архітектура*. Харків, 2016. Вип. 132. 144 с.
9. Палеха Ю. Н. Особенности использования ГИС-технологий в оценке территорий населенных пунктов Украины. *Ученые записки Таврического национального университета им. В. В. Вернадского. География*. Симферополь, 2003. Т. 16 (55). С. 125–132.
10. Петриченко В., Балюк С., Медведєв В. Моніторинг земель як рятівний круг. *Урядовий кур'єр*. 2014. 12 квітня. № 68. С. 8.
11. Оверковська Т. К. Моніторинг земель України: правові аспекти. *Юридичний вісник*. 2015. № 1. С. 12–128. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rj> (дата звернення: 25.09.2022).

12. Юридична енциклопедія: у 6 т. / редкол.: Ю. Шемшученко та ін. Київ: Укр. Енцикл., 2001. С. 764.

13. Позняк Е. В. Правові засади здійснення моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки. *Актуальні проблеми становлення і розвитку права екологічної безпеки в Україні: матеріали наук.-практ. Круглого столу, 28 березня 2014 р., м. Київ* / ред. кол. М. В. Краснова [та ін.]; Київський нац. ун-т ім. Т. Шевченка. Чернівці: Кондратьєв А. В., 2014. С. 65–68.

14. Моніторинг земель сільськогосподарського призначення / М. В. Вишиванюк, В. Х. Брус, І. Ф. Баланюк, П. Є. Матковський. URL: <http://personal.pu.if.ua/depart/petro.matkovsky/resource/file/pdf/Monitoring%20of%20land.pdf> (дата звернення: 18.09.2022).

Канівець Олена Миколаївна, аспірант Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID: 0000-0002-9597-6617. Тел.: +380992917354. E-mail: leva1205@ukr.net.

Kanivets Olena, graduate student O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID: 0000-0002-9597-6617. Tel.: +380992917354. E-mail: leva1205@ukr.net.

Статтю прийнято 20.10.2022 р.

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

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

Випуск 202

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

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 22.12.2022 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 11,0. Тираж 50. Замовлення № .

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