

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

Збірник наукових праць
За загальною редакцією М.І. Черновола
Заснований у 1997 році

**В и п у с к 7(38)
Частина II**

Кропивницький • 2023

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.
TECHNICAL SCIENCES**

Collected Works
Under the general editorship of M. Chernovol
Founded in 1997

**Issue 7(38)
Part II**

Kropyvnytskyi • 2023

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 29 травня 2023 року № 9.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Лисенко С.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Доренський О.П., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Дідик О.К., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, доц.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Коренькова Т.В., д-р техн. наук, доц.; Кузик О.В., канд. техн. наук, доц.; Матейчик В.П., д-р техн. наук, проф.; Мацуї А.М. канд. техн. наук, доц.; Мелешко Є.В., д-р техн. наук, проф.; Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А. д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук, проф.; Плешков П.Г., канд. техн. наук, проф.; Россолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук; Солових Є.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Тарандушка Л.А., д-р техн. наук, доц.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, доц.; Яцун В.В., канд. техн. наук, доц.

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522)
390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Реєстраційне свідоцтво: серія KB № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.3.019.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.3-11)

В.В. Смірнов, доц., канд. техн. наук, **Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна
e-mail: swckntu@gmail.com

Мобільна mesh-мережа для управління роєм об'єктів

Наведено опис архітектури адаптивної бездротової локальної mesh-мережі, яка розроблена для управління робототехнічними пристроями, коптерами та роями об'єктів. Бездротова mesh-мережа є адаптивною, що самоорганізується і здатна працювати автономно. Подано протокол конфігурування вузла мережі та протокол керування мережею. Процедура реконфігурації мережі та передача даних розподіляє службовий трафік та трафік даних різними каналами. Наведено результати вимірювань параметрів мережі в різних режимах роботи. Показано, що вузли мережі адаптивно змінюють потужність трансмітера з метою мінімізації рівня випромінювання сигналу та з метою економного використання автономного джерела живлення.

mesh-мережа, рій, архітектура, протокол, контролер, вузол мережі, кластер

Постановка проблеми. Існують бездротові локальні мережі різної архітектури, які застосовуються для автоматизації та керування різними технічними об'єктами. Архітектурні та технічні реалізації малих бездротових мереж не завжди є оптимальними. Наприклад, при зміні топології мережі окремі об'єкти (вузли) мережі можуть втратити зв'язок з іншими об'єктами мережі, а при відмові мережевого сервера мережа перестає працювати.

Таким чином, мережа повинна адаптуватися до зміни своєї топології, шляхом відновлення втрачених та встановлення нових зв'язків та маршрутів обміну даними між об'єктами мережі.

У бездротовій мережі кількість об'єктів може досягати кількох десятків. Всі об'єкти бездротової мережі взаємодіють із сервером та між собою за допомогою трансіверів різних типів. При цьому потужність передавачів трансіверів може досягати +27 dB. Для об'єктів мережі з автономним живленням велике значення має потужність споживання енергії трансівером. Чим більша потужність передавача трансівера, тим швидше розряджаються елементи живлення об'єкта. Тому потужність передавача має бути мінімально необхідною та адаптивно змінюватися при зміні топології мережі.

Аналіз досліджень та публікацій. Для бездротових мереж існує низка стандартів на мережеві протоколи. На базі цих стандартів розробляються архітектури та топології сетей.

Технологія мереж Wi-Fi описана стандартом IEEE 802.11 [1, 2]. Мережа стандарту IEEE 802.11 займає діапазон частот 2,4 та 5 ГГц. Перевагою мережі є велика пропускна здатність. Недоліком є невелика кількість одночасних підключень. Час встановлення з'єднання відносно великий (до 10 секунд). Недоліком, який перешкоджає створенню бездротових автономних мереж, також є великий струм, що споживається від джерела живлення.

Технологія ZigBee описана стандартом IEEE 802.15.4 для бездротових мереж з маршрутизацією [3-6]. Відповідно до стандарту, в мережі знаходяться два типи вузлів:

Full-Function Device (FFD) та Reduced-Function Device (RFD). Вузол FFD реалізує повний набір мережевих функцій, а вузол RFD є полегшеним варіантом. Обидва типи вузлів можуть бути координаторами підмереж. Технологія ZigBee дозволяє будувати різні топології, наприклад топологію «зірка» або peer-to-peer (P2P). Якщо топологія мережі динамічно змінюється, мережа неспроможна стійко працювати. Це є обмеженням для побудови мереж із змінною топологією.

Документ ITU-T G.9959 описує мережу Z-Wave, яка дозволяє створювати осередки, що самоорганізуються, і є хорошим рішенням для управління об'єктами. Однак для створення контролерів мережі необхідно бути членом спілки Z-Wave Alliance та мати сертифікат [7-8].

Технологія WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) описується стандартом IEEE 802.16. Стандарт визначає технологію множинного доступу з розподілом часу (TDMA) [9-10]. Технологія вимагає використання базових станцій, абонентських станцій та іншого мережевого обладнання. Це перешкоджає створенню недорогої бездротової мережі для керування роєм об'єктів.

Набула поширення технологія LoRaWAN, яка має як переваги, так і недоліки [11-13]. До переваг можна віднести такі параметри, як дальність передачі радіосигналу на відкритій місцевості до 15 км, низьке енергоспоживання та можливість масштабування мережі.

До недоліків можна віднести низьку пропускну здатність (0,3-50 кб/с), затримку передачі даних до кількох десятків секунд та відсутність підтримки mesh-архітектури.

Постановка задачі. Бездротова mesh-мережа повинна забезпечити:

- управління як окремими об'єктами, так і роєм об'єктів, наприклад, коптерами, роботами та іншими механізмами, призначеними для пошуку та виявлення предметів, доставки вантажів, прихованого спостереження та відеозйомки;
- мобільний, захищений від виявлення, прихований зв'язок між об'єктами невеликого рою (взвод, рота) з метою організації ефективного управління та взаємодії невеликих груп в умовах воєнних дій або рятувальних операцій;
- моніторинг та збір інформації з віддалених датчиків у локальних та розподілених приладах і системах;
- мінімальний рівень випромінювання трансмітерів трансіверів, можливість встановлення, налаштування та експлуатації мережі силами некваліфікованого користувача.
- стабільну взаємодію об'єктів мережі за зміни її топології;

Виклад основного матеріалу. Для створення прототипу mesh-мережі були розроблені, виготовлені і впроваджені у навчальний процес ЦНТУ спеціальні апаратно-програмні комплекси «Internet of Things development board» [14]. Кожен комплекс укомплектований трансіверами різної потужності, які дозволяють забезпечити пряму взаємодію вузлів мережі на відстані від 100 м до 5 км. (рис.1).



Рисунок 1 – Апаратно-програмний комплекс «Internet Of Things development board»
Джерело: розроблено автором

На базі створеного прототипу було розроблено програмне забезпечення для тестування трансіверів, проведено випробування трансіверів та проведені необхідні вимірювання.

Було розроблено архітектуру контролера вузла адаптивної бездротової mesh-мережі (рис. 2)

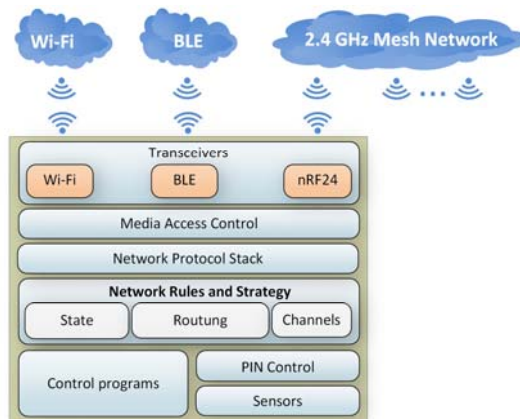


Рисунок 2 – Архітектура контролера вузла mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

Через трансівери управління (Wi-Fi, BLE) здійснюється зв'язок вузла мережі з оператором з метою отримання команд та надсилання інформації телеметрії та поточного стану об'єктів мережі.

Через трансівер nRF24 здійснюється обмін даними між вузлами мережі. Інформація про поточний стан мережі, така як топологія мережі, таблиці маршрутизації та ієрархія кластерів об'єктів або роїв оновлюється з періодом 5 сек.

Інтерфейси з трансіверами (Transceivers Interfaces) забезпечують взаємодію трансіверів з блоком Media Access Control, що реалізує стек мережевих протоколів (Network Protocol Stack).

Стек мережних протоколів містить декілька протоколів, кожен з яких реалізує функції управління, конфігурації та обміну даними у мережі.

Блок правил та стратегії поведінки мережі (Network Rules and Strategy) визначає функціональність контролера вузла мережі. До блоку правил та стратегії входять програмні модулі управління маршрутизацією, перемиканням каналів трансіверів, адаптивного зміни конфігурації мережі за зміни її топології.

Взаємодія контролера вузла мережі з об'єктом управління реалізується інтерфейсом Network Object Interface.

Реалізація вузла mesh-мережі представлена на рис. 3.

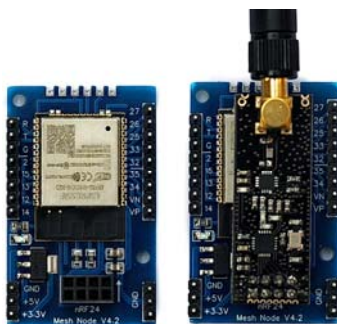


Рисунок 3 – Реалізація вузла mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

За результатами вимірювань параметрів вузлів мережі та натурних експериментів на місцевості було розроблено архітектуру адаптивної mesh-мережі (рис. 4), а також інтерфейси та протоколи мережевого обміну командами та даними.

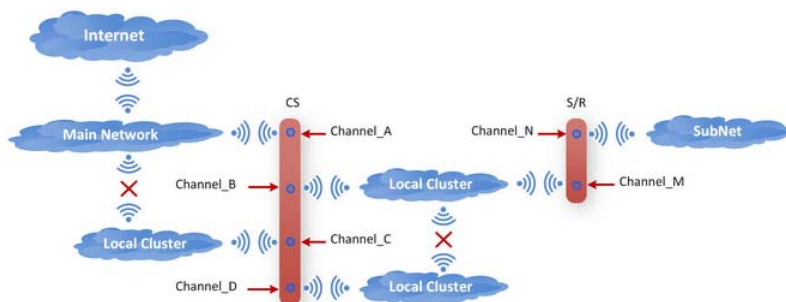


Рисунок 4 – Архітектура адаптивної mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

Було встановлено, що застосування малопотужних трансівєрів з радіусом дії від 100 м до 1 км (рис. 5), дозволяє організувати mesh-мережу довільної конфігурації.

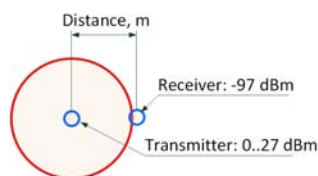


Рисунок 5 – Зона покриття трансівєра

Джерело: розроблено автором.

Наприклад лінійна мережа (ланцюг), в якій кожен вузол (об'єкт рою) взаємодіє тільки з двома сусідніми, має низький рівень випромінювання сигналу, а отже, меншу ймовірність виявлення і можливості прослуховування трафіку і злому протоколу обміну (рис. 6).

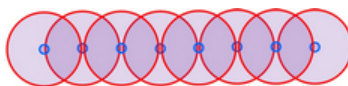


Рисунок 6 – Лінійна мережа (ланцюг)

Джерело: розроблено автором.

Кожен вузол (об'єкт рою) взаємодіє лише з найближчими вузлами і лише їм передає транзитні пакети. Тому для забезпечення скритності вузла мережі потужність трансівєра в кожному конкретному випадку повинна бути адаптивною і мінімальною необхідною.

Зрозуміло, що при малій потужності трансівєра зменшується радіус зони покриття мережі (розмір рою), що може бути не завжди прийнятним. У цьому випадку легко змінюються трансівєри або задіюються ретранслятори.

З іншого боку, зменшення радіусу зони покриття мережі дозволяє використовувати кілька каналів зв'язку одночасно, при цьому не впливаючи на інші мережі (рої). Потужність трансівєра встановлюється кожним вузлом за встановленим критерієм кількості повторних передач пакетів.

Такий підхід дозволяє створювати кластери мережевих об'єктів а також дочірні рої, розподілені за територіальною чи функціональною ознакою.

Всі вузли мережі мають кілька зв'язків з іншими об'єктами мережі. В цьому випадку обмін даними між вузлами мережі здійснюється за допомогою прямих зв'язків.

Якщо прямі зв'язки між вузлами мережі не встановлені, здійснюється маршрутизація пакетів від вузла-відправника до вузла-отримувача (рис. 7).

Приймачем та ретранслятором пакетів може бути будь-який вузол мережі. Ретрансляція здійснюється на основі даних таблиць маршрутизації, які має кожен вузол мережі.

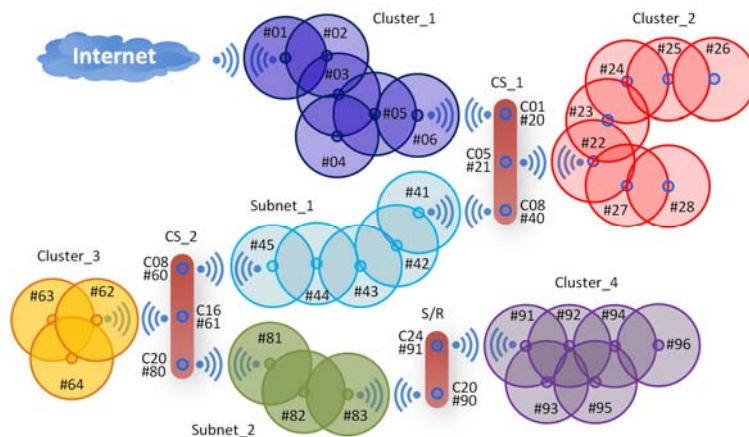


Рисунок 7 – Топологія мережі для проведення тестових випробувань

Джерело: розроблено автором

Безперебійна робота мережі забезпечується програмним забезпеченням на рівні контролера вузла мережі. Усі контролери вузлів мережі за промовчанням рівнозначні, проте їх функції можуть змінюватися внаслідок адаптації до фізичної та логічної топології мережі, яка може динамічно змінюватися.

Налаштування параметрів вузла мережі здійснюється за допомогою AT-команд відповідно до протоколу налаштування та керування вузлом. (рис. 8).

Node Control AT Commands			
3 bytes	1 byte	1 byte	1 byte
AT+	Param_1	Param_2	Param_3

Рисунок 8 – Протокол налаштування та управління вузла

Джерело: розроблено автором

Передача мережевих команд вузлам мережі здійснюється за допомогою протоколу управління (рис. 9).

Net Control Commands			
1 byte	1 byte	1 byte	1 ... 29 bytes
Prefix	Command	Postfix	Params

Рисунок 9 – Протокол мережевого управління вузлами

Джерело: розроблено автором

Для контролю параметрів мережі було створено спеціальну програму «Wireless Net Monitor». Структура mesh-мережі, представлена на рис.7, у програмі представлена в такий спосіб:



Рисунок 10 – Відображення структури mesh-мережі

Джерело: розроблено автором

Період запуску режиму реконфігурації mesh-мережі встановлюється користувачем та залежить від динаміки зміни топології мережі.

Якщо топологія мережі статична, або змінюється повільно, період запуску режиму реконфігурації може бути збільшено,

Якщо вузли мережі переміщуються у просторі, тим самим змінюючи топологію мережі, період запуску режиму реконфігурації зменшується.

У процесі реконфігурації мережі потужність трансмітерів трансіверів вузлів мережі може змінюватися від максимального значення до мінімально необхідного (рис. 11).

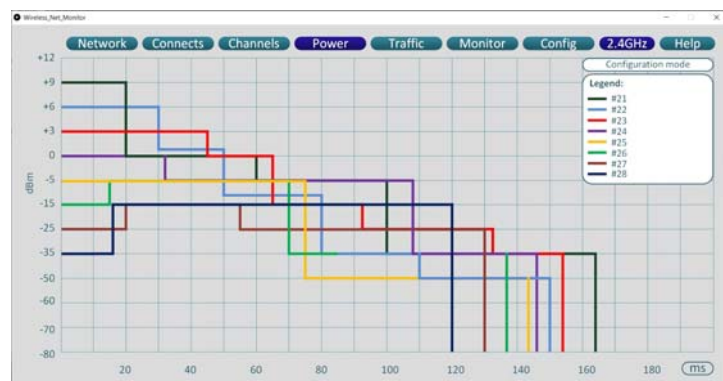


Рисунок 11 – Зміна потужності трансіверів у процесі реконфігурації

Джерело: розроблено автором

Для зменшення кількості колізій в мережі при інтенсивному трафіку, вузли в мережі організуються в кластери або підмережі (рої) за функціональною або територіальною ознакою. Кожен кластер (рій) працює на своєму каналі (рис.12).

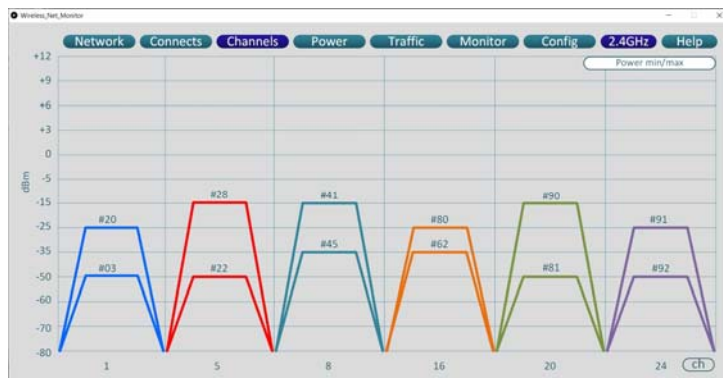


Рисунок 12 – Розподіл каналів за кластерами вузлів мережі

Джерело: розроблено автором.

На рис. 13 представлені результати вимірювань рівнів випромінювання WI-FI трансіверів та трансіверів mesh-мережі при встановленій потужності 0 dB. При тестуванні вузли мережі обмінювалися пакетами даних довжиною 150 байт із періодом 500 мс. Вимірювач встановлений на однаковій дистанції від усіх трансіверів.

З графіку результатів вимірів випливає, що різниця в рівні випромінювання WI-FI трансіверів та трансіверами mesh-мережі в одиницю часу становить понад 25 dB.

Різниця обумовлена тим, що трансівери WI-FI працюють постійно навіть за відсутності інформаційного обміну, а трансівери mesh-мережі працюють лише в режимі обміну інформацією та в режимі конфігурування мережі з певним інтервалом. Після сеансу обміну даними контролер вузла мережі та трансівер переходять у стан сну і прокидається при отриманні мережного пакета.

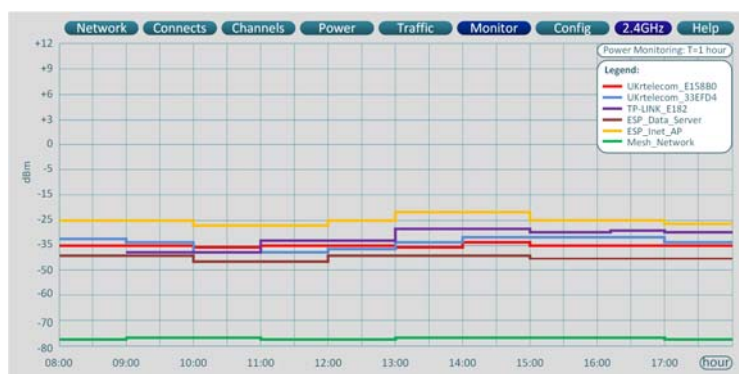


Рисунок 13 – Рівні потужності випромінювання WI-FI трансіверів та вузлів mesh-мережі
Джерело: розроблено автором.

З цього випливає, що технологія WI-FI не відповідає вимогам, які пред'являються для mesh-мережі, що розробляється. Це такі вимоги, як скритність для виявлення та економічність у витрачаннях ємності джерела живлення вузла мережі (об'єкта рою).

Висновки. Таким чином, досягнуті результати повною мірою відповідають розрахунковим, а завершення роботи по створенню mesh-мережі дозволить вирішити поставлені завдання та забезпечити:

- стабільну взаємодію вузлів мережі при зміні топології мережі з адаптивною мінімізацією потужності трансіверів індивідуально для кожного вузла мережі;
- обмін даними між вузлами мережі як безпосередньо між собою, так і через ретранслятори та шлюзи без втрат інформаційних пакетів;
- масштабування mesh-мережі із заданою топологією з охопленням площі від 0.04 км² (мінімальна потужність, відсутність ретрансляції пакетів, відсутність перешкод на місцевості) до 65 км² (максимальна потужність, 2 ретранслятори в ланцюжку, є перешкоди на місцевості);
- простоту створення прикладних додатків програмістами та користувачами для вирішення різних завдань для збору інформації та управління як окремими об'єктами, так і роєм об'єктів, а також організації прихованого зв'язку в масштабованій mesh-мережі за допомогою розробленого API;
- можливість встановлення, налаштування та експлуатації mesh-мережі силами користувача.

Список литературы

1. Brian Verenkoff Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology. July 2011. 8 p. URL: https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf (дата звернення: 12.03.2023).
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6. URL: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> (дата звернення: 12.03.2023).
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата звернення: 12.03.2023).
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2003.06.12. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html (дата звернення: 12.03.2023).
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee. 2020.05.06. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html (дата звернення: 12.03.2023).
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques. Jan. 2020. URL: <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> (дата звернення: 12.03.2023).
7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices. Vesternet Ltd. 28.01.2020. URL: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> (дата звернення: 12.03.2023).
8. Recommendation G.9959. URL: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> (дата звернення: 12.03.2023).
9. WiMAX Forum. URL: <http://wimaxforum.org> (дата звернення: 12.03.2023).
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. URL: <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> (дата звернення: 12.03.2023).
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January.
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band.
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, Datasheet, 2015 Semtech Corporation.
14. Смірнов В.В., Смірнова Н.В., Пархоменко Ю.М. Апаратно-програмний комплекс «Internet of Things Development Board». Збірник матеріалів III форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2021. Харків, ХНУРЕ, 2021. 65 с.

Referencis

1. Brian Verenkoff. (July 2011). Understanding and Optimizing 802.11n. Buffalo Technology : website. *lmi.net*. Retrieved from https://www.lmi.net/wp-content/uploads/Optimizing_802.11n.pdf [in English].
2. Wi-Fi Alliance® introduces Wi-Fi 6 (n.d.) : website. *wi-fi.org*. Retrieved from <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6> [in English].
3. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
4. IEEE 802.15.2-2003 - IEEE Recommended Practice for Information technology - Local and metropolitan area networks (2003.06.12). *Standards Committee : C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_2-2003.html [in English].
5. IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2020.05.06). *Standards Committee: C/LM - LAN/MAN Standards Committee* : website. *standards.ieee.org*. Retrieved from https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html [in English].
6. P802.15.4z/D06, Jan. 2020 - IEEE Draft Standard for Low-Rate Wireless Networks Amendment: Enhanced High Rate Pulse (HRP) and Low Rate Pulse (LRP) Ultra Wide-Band (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques (Jan. 2020) : website. *libris.kb.se*. Retrieved from <http://libris.kb.se/bib/fr02gv53cvb60ktf> [in English].

7. Understanding Z-Wave Networks, Nodes & Devices (28.01.2020). *Vesternet Ltd.* : website. *vesternet.com*. Retrieved from <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices> [in English].
8. Recommendation G.9959 (n.d.) : website. *itu.int*. Retrieved from <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.9959-201202-I/en> [in English].
9. WiMAX Forum (n.d.) : website. *wimaxforum.org*. Retrieved from <http://wimaxforum.org> [in English].
10. IEEE Std 802.16™-2009. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. 29 May 2009. Retrieved from <https://legal.vvv.enseirb-matmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf> [in English].
11. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1.0, 2015 January [in English].
12. LoRaWAN Regional Parameters, RU 864-869MHz ISM Band [in English].
13. SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, Datasheet, 2015 Semtech Corporation [in English].
14. Smirnov, V.V., Smirnova, N.V. & Parkhomenko, Y.M. (2021). Aparatno-prohramnyy kompleks "Internet of Things Development Board". Zbirnyk materialiv III forumu «Avtomatyzatsiya, elektronika ta robototekhnika. Stratehiyi rozvytku ta innovatsiyni tekhnolohiyi» AERT-2021. Kharkiv, KHNURE [in Ukrainian].

Volodymyr Smirnov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

A Mobile Mesh-Network for Control a Swarm of Objects

The purpose of the article is to develop an adaptive wireless mesh-network architecture for managing technological processes, robotic devices and other objects. The article describes the architecture of a wireless mesh-network.

The concept of a wireless mesh-network is described. The mesh-network is self-organizing, adaptive, and to be work autonomously able. The presented wireless mesh node controller architecture is the basis for small control systems for many objects and a swarm of objects. The interaction of network nodes is carried out using several transceivers.

Multiple transceivers allow for the separation of control traffic and data traffic on different channels. The protocol stack is optimized for the functioning of the mesh network. The topology of a mesh network can change dynamically. That is, network nodes can move in space without losing communication with each other. The current state of the network is updated with a period that depends on the rate of change of the network node in the space.

The mesh network configuration strategy and algorithms allow you to effectively build a network topology and establish interaction between network nodes. There can be many objects in the network that can act as a relay. A repeater can be a network node and a special dedicated repeater node. The low cost of network nodes makes it possible to create a low-cost network for performing various functions of object control and data transmission. The network can be used to manage a swarm of objects.

Proprietary software is used to increase the efficiency of forming routing tables taking into account cluster structures in a mesh network. The mesh network can be used to control IoT objects, robotic objects, as well as a variety of objects and control systems for various technological processes.

mesh-network, swarm, architecture, protocol, controller, network node, cluster

Одержано (Received) 27.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 05.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

Р.М. Минайленко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Дреєв**, доц., канд. техн. наук,
О.К. Коноплицька-Слободенюк, викл., **В.А. Резніченко**, викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
e-mail: aron70@ukr.net

Застосування мікроконтролера Raspberry Pi для управління та моніторингу IoT систем

В статті розглядається питання застосування мікроконтролера Raspberry Pi для управління та моніторингу елементів системи Інтернету речей (IoT). Показано, що на теперішній час на ринку існує достатньо велика кількість об'єктів, які можна автоматизувати та багато фірм, які пропонують різні варіанти автоматизованих систем для задоволення потреб клієнта. Також у світі існує попит на віддалене керування різними об'єктами. Метою даної статті є дослідження засобів для побудови IoT і визначення методів управління та моніторингу елементів IoT на прикладі використання мікроконтролера Raspberry Pi.

інтернет речей, мікроконтролер, мережа, система керування

Постановка проблеми. Широкому поширенню Інтернету речей (IoT) сприяє масова поява пристроїв, оснащених електронікою, програмним забезпеченням (ПЗ) і комунікаційними системами, призначеними для збору та передачі даних [1, 2, 3, 4].

Через деякий час технології та системи на основі IoT будуть широко впроваджені практично на всіх виробничих підприємствах. Інтернет речей є актуальною темою, оскільки з'являється велика кількість пристроїв, здатних обмінюватися даними без втручання людини, як у повсякденному житті, так і в промисловості [2,5].

У зв'язку зі стрімким розвитком технологій відбувається злиття великих компаній з метою розробки єдиних стандартів і протоколів для роботи пристроїв IoT. Вся галузь рухається в напрямку розробки автоматизованих систем з мінімальним втручанням людини. Але повинні існувати способи контролю цими пристроями, оскільки вони можуть містити програмні чи апаратні помилки, які необхідно усунути за короткий час. Також повинні бути інтерфейси для керування та моніторингу пристроїв IoT для зручності використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні Інтернет речей почав суттєво впливати на розвиток промислового та споживчого ринку. Робототехніка, автономні транспортні засоби, цифрові помічники та штучний інтелект — це технології, які виводять розробників і користувачів на новий рівень створення електронних додатків [4-8].

Інтернет речей є наступним кроком на шляху до оцифрування сучасного суспільства, де об'єкти та люди пов'язані між собою через комунікаційні мережі. При цьому виникає потреба стеження за станом об'єктів та станом навколишнього середовища. А розробники таких систем намагаються максимально вдосконалити свої продукти. Інтернет речей надає підприємствам нові можливості та конкурентні переваги як на існуючих, так і на нових ринках.

На даний час існує багато об'єктів, які можна автоматизувати, і багато компаній, які пропонують різні варіанти для задоволення потреб замовника. І такі потреби можуть виникнути не тільки у підприємств з багатотисячними бюджетами, ай у звичайних споживачів, яким потрібно запропонувати якісний продукт, але значно дешевший [9-12].

З кожним роком компанії роблять великий внесок у розвиток новітніх технологій, тому попередні розробки швидко старіють і дешевшають, але можуть ще деякий час не втрачати своєї актуальності. Тому однією з форм удосконалення таких продуктів є динамічне оновлення апаратного забезпечення, яке відповідатиме вимогам сьогодення.

Постановка завдання. Моніторинг і керування пристроями систем IoT в режимі реального часу є одним із важливих заходів безпеки та комфорту користувачів. Щорічне зростання користувачів Інтернету та модифікація Інтернет-технологій дозволяють створювати мережі повсякденних об'єктів, і користувачі покладають великі надії на системи з підтримкою Інтернету.

Перевагами таких систем є:

1. Зменшення експлуатаційних витрат за рахунок дистанційного моніторингу, діагностики, налагодження та модернізації мікропрограм.
2. Зручність та безпека з можливістю дистанційного контролю стану об'єкта та керування інтернет-пристроями.
3. Дистанційний моніторинг житлових і промислових об'єктів, оповіщення аварійних служб у разі пожежі, крадіжки та витoku води чи газу.

Подібні Інтернет-системи збирають великий обсяг інформації, яка компілюється на центральному сервері, і лише потім надається клієнтам через Інтернет [2, 5].

Тому постало завдання дослідити, що таке мережа IoT, які технології та протоколи в ній використовуються, з мінімальним апаратним і програмним забезпеченням, необхідним для роботи системи контролю та моніторингу елементів системи Інтернету речей.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз архітектури IoT.
2. Проаналізувати існуючі типи мереж, протоколи з'єднання пристроїв в одну мережу;
3. Проаналізувати апаратне забезпечення системи IoT;
4. Провести аналіз існуючого програмного забезпечення моніторингу та управління;
5. Провести синтез розглянутих рішень для вирішення поставленої мети.

Крім того, слід враховувати, що поряд з перевагами використання технологій IoT зростає також загроза їх неправомірного використання, збирання персональних даних, втручання в приватне життя громадян, кіберзагрози тощо.

Виклад основного матеріалу. Проаналізуємо, які пристрої використовуються для побудови мережі IoT:

1. Вбудовані системи використовують обладнання та програмне забезпечення (ПЗ) і керують певними функціями, пов'язаними з більшою системою. Вбудовані системи створюються на основі мікропроцесорів або мікроконтролерів.
2. Інтелектуальні системи можуть виконувати обчислення і частіше всього оснащені мікроконтролером.
3. Мікроконтролери (MCU) оснащені центральним процесором (ЦП), оперативним запам'ятовуючим пристроєм (ОЗП) і постійним запам'ятовуючим

пристроєм (ПЗП). Вони містять елементи, необхідні для виконання нескладних завдань і мають обмежену потужність на відміну від мікропроцесорів.

4. Мікропроцесори (MPU) – реалізують функції ЦП на одній або декількох інтегральних мікросхемах (IC).

5. Пристрої, які встановлюють підключення і передають дані без можливості їх обробки.

6. Перетворювачі (фізичні пристрої) призначені для перетворення одних видів енергії в інші. До них відносяться внутрішні датчики і виконавчі пристрої, що передають дані в залежності від того, як об'єкти взаємодіють в певному середовищі [8-12]. Для подальшого вибору необхідного обладнання та розуміння роботи системи потрібно провести аналіз архітектури IoT.

Тобто для кожної проектованої IoT потрібна надійна архітектура, яка б була спроможною виконувати поставлені завдання [8, 10].

З метою забезпечення моніторингу та досягнення поставлених завдань до IoT можна використати мікроконтролер Raspberry Pi, який здатний забезпечувати як прості практичні завдання, наприклад, програвання відео- та прослуховування аудіофайлів, так і більш складні задачі, наприклад бути частиною системи IoT.

Оскільки власної операційної системи (ОС) у внутрішній пам'яті (як, наприклад, в телефонах) Raspberry Pi немає, то після будь-якого невдалого експерименту досить перезаписати дистрибутив на карті пам'яті, і мікроконтролер знову готовий до роботи.

Для підключення дисплею на платі мікроконтролера Raspberry Pi є два інтерфейси: RCA Video (компонитний) і HDMI. При використанні певних перехідників, можна використати більш традиційні: VGA і DVI. HDMI підтримує передавання відео і звуку. Підключення мікрофона теж передбачено, але для цього знадобиться відповідний USB-пристрій, який би був сумісним з міні-ПК Raspberry Pi.

На даний час Raspberry Pi не оснащують модулями Wi-Fi, тому для роботи з ними в мережі Інтернеті використовують порт Ethernet (на платі він скомутований через USB 2.0 і забезпечує швидкість 100 мегабіт).

Частота процесора становить 700 МГц, але в залежності від виробника її можна підняти до 1000 МГц без втрати продуктивності. Чіп пам'яті виробництва Samsung або Hynix напаяний поверх основного чіпсета, тому збільшення RAM самостійно не передбачено.

У новій версії – міні-ПК Raspberry Pi 2 Model B представлений на рисунку 1, замість процесора BCM2835 встановлено BCM2836, який відрізняється від попередника наявністю чотирьох ядер ARM Cortex-A53 з набором інструкцій ARMv7 – на відміну від ARMv6k у BCM2835. Тактова частота цього процесора становить 1400 МГц. Відеоядро залишилось без змін, і це як і раніше Broadcom VideoCore IV. Розробники заявляють про шестиразовий приріст продуктивності в багатопотокових тестах і про триразовий в однопотокових [11, 12]. Схему міні-ПК Raspberry Pi 2 Model B показано на рис.1.

Для створення системи моніторингу та керування елементами IoT потрібно скласти список необхідного обладнання. І це є важливим кроком, оскільки потрібний не тільки центральний пристрій, такий як Raspberry Pi, а й певний набір периферійних пристроїв таких як клавіатура, миша, монітор, карта пам'яті і т.д. Крім того, невід'ємною частиною такої системи є датчики температури, тиску, освітлення.

Оскільки у Raspberry Pi не передбачено Wi-Fi модуля, то встановлюють Wi-Fi адаптер, який дозволяє підвищити мобільність системи і дозволяє бути не прив'язаним до мережевих дротів.

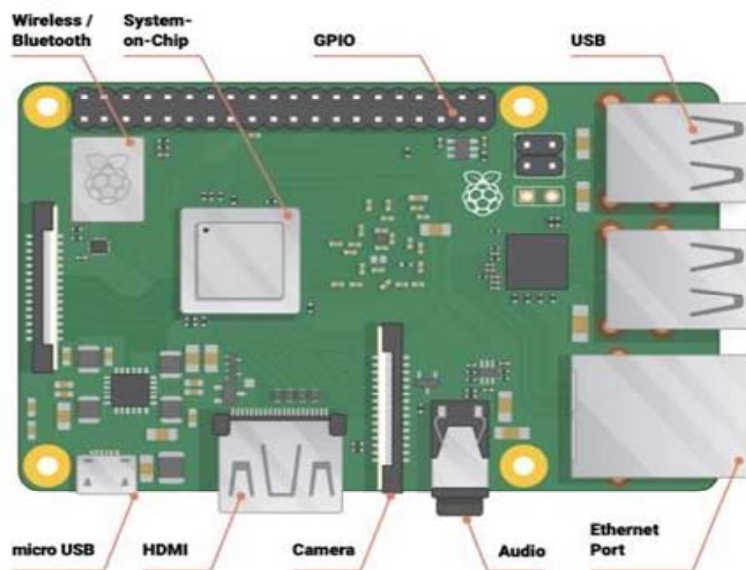


Рисунок 1 – Схема міні-ПК Raspberry Pi 2 Model B

Джерело: [11]

Підключення Raspberry Pi до джерела живлення є завершуючим кроком процесу апаратного налаштування, і це потрібно робити тільки тоді, коли користувач готовий налаштувати програмне забезпечення, так як Raspberry Pi не має власного вимикача живлення.

Загальний вигляд міні-ПК Raspberry Pi з підключеними пристроями показано на рисунку 2:

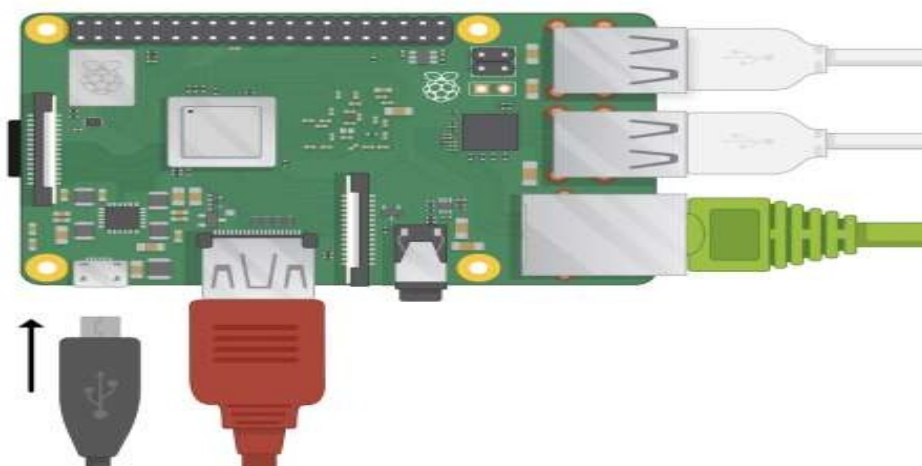


Рисунок 2 – Загальний вигляд міні-ПК Raspberry Pi з підключеними пристроями

Джерело: [11]

Периферія підключена по кабелю USB, монітор по кабелю HDMI, адаптер живлення – через microUSB[4,5,7,9].

Повна структурна схема системи IoT на основі міні-ПК Raspberry Pi представлена на рисунку 3:

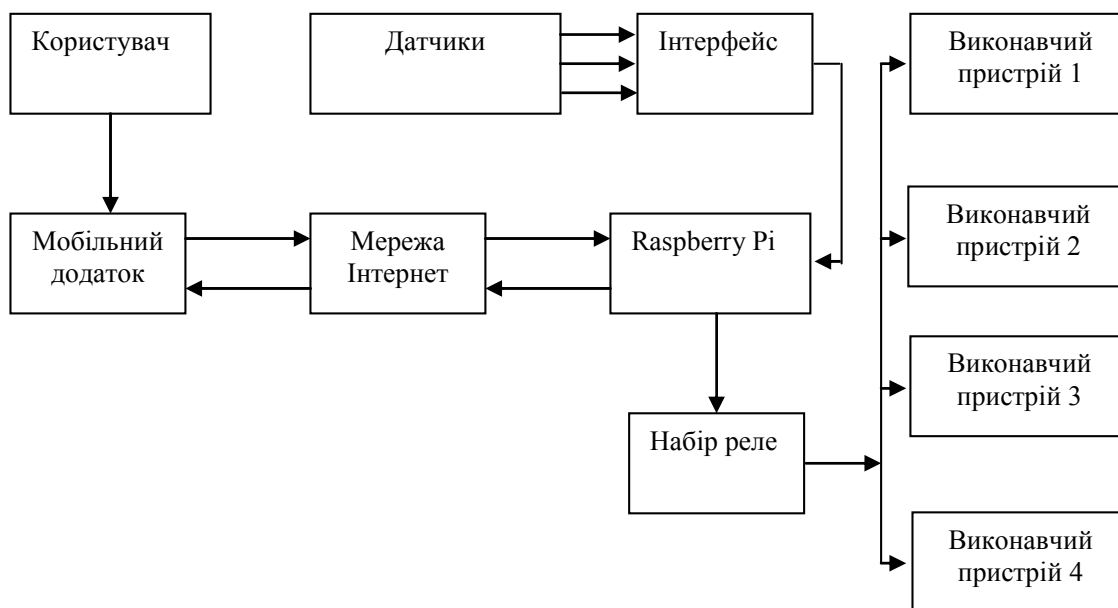


Рисунок 3 – Повна структурна схема системи IoT на основі міні-ПК Raspberry Pi

Джерело: розроблено автором

Така система може контролювати стан датчиків через Інтернет, коли оновлення інформації на веб-сервері зчитується за розробленим алгоритмом, що подається в Raspberry Pi, а потім система відгукується на певні інструкції з високим ступенем захисту інформації. Користувач може безпосередньо входити в систему та взаємодіяти із вбудованим пристроєм у режимі реального часу.

Висновки. У статті проаналізовано компоненти системи IoT та запропоновано систему моніторингу та управління на основі мікроконтролера Raspberry Pi. Використання мікроконтролера Raspberry Pi дозволяє забезпечити всі вимоги для побудови системи управління та моніторингу елементів IoT і є доступним технічним рішенням, яке можна використовувати практично у всіх галузях промисловості та домашнього використання.

Запропонована система є енергоефективною, інтелектуальною, недорогою, портативною та високопродуктивною.

Список літератури

1. Iot based monitoring and control system for appliances . 2018. URL : https://www.ripublication.com/acst18/acstv11n1_04.pdf (дата зверення: 29.04.2023).
2. Створення інформаційної системи моніторингу забруднення атмосферного повітря міста на основі технології «інтернет речей» / В. Б. Мокін та ін. Вісник Вінницького національного технічного університету. 2017. №3. С. 49–57.
3. What is iot architecture? *Avsystem*: website. 2020. URL : <https://www.avsystem.com/blog/what-is-iot-architecture/> (дата зверення: 29.04.2023).
4. Remote monitoring and alerting for iot. 2020. URL : <https://cloud.google.com/solutions/remote-monitoring-and-alerting-for-iot> (дата зверення: 29.04.2023).
5. Bmp180 barometric pressure/temperature/altitude sensor- 5v ready . *Adafruit*: website. URL : <https://www.adafruit.com/product/1603> (дата зверення: 30.04.2023).
6. Wifi адаптер edup ep-n8531. *China electronics*: website. URL : <http://china-electronics.com.ua/ru/edup/680-wifi-edup-ep-n8531.html> (дата зверення: 30.04.2023).
7. The official raspberry pi how to use your new computer beginner's guide. *The Magpi magazine*: website. URL : https://www.raspberrypi.org/magpi-issues/beginners_guide_v1.pdf (дата зверення: 30.04.2023).
8. Система domoticz . *Domoticzfaq* : website. URL : <https://domoticzfaq.ru/o-системе-domoticz/> (дата зверення: 02.05.2023).

9. Domoticz api/json url's. *Domoticz*: website. 2020. URL : https://www.domoticz.com/wiki/domoticz_api/json_url%27s. (дата звернення: 02.05.2023).
10. Ho S. Pro spring 3 / с. Ho, R. Harrop. united kingdom: apress, 2012. 944 с.
11. Bloch J. Effective java third edition. 2018. URL : <https://kea.nu/files/textbooks/new/effective%20java%20%282017%2c%20addison-wesley%29.pdf> (дата звернення: 07.05.2023).
12. Будай А. Дизайн-патерни – просто, як двері. 2012. URL : https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/632/mod_resource/content/1/designpatterns_andriy_buday.pdf (дата звернення: 07.05.2023).

References

1. Iot based monitoring and control system for appliances. (2018). *ripublication.com*. Retrieved from https://www.ripublication.com/acst18/acstv11n1_04.pdf [in English].
2. Mokin, V.B., Sobko, B.Yu., Dratovany, M.V. et al. (2017). Stvorennia informatsijnoi systemy monitorynhu zabrudnennia atmosfernoho povitria mista na osnovi tekhnolohii «internet rechej» [Creation of an information system for monitoring atmospheric air pollution in the city based on the Internet of Things technology]. *Visnyk Vinnyts'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Vinnytsia National Technical University*, 3, 49–57 [in Ukrainian].
3. What is IoT architecture? (2020). *avsystem.com* . Retrieved from <https://www.avsystem.com/blog/what-is-iot-architecture/> [in English].
4. Remote monitoring and alerting for iot . (2020). *cloud.google.com*. Retrieved from <https://cloud.google.com/solutions/remote-monitoring-and-alerting-for-iot> [in English].
5. Bmp180 barometric pressure/temperature/altitude sensor- 5v ready . Retrieved from <https://www.adafruit.com/product/1603> [in English].
6. Wifi adapter edup ep-n8531 . *china-electronics.com.ua* . Retrieved from <http://china-electronics.com.ua/ru/edup/680-wifi-edup-ep-n8531.html> [in English].
7. The official raspberry pi how to use your new computer beginner's guide. *raspberrypi.org*. Retrieved from https://www.raspberrypi.org/magpi-issues/beginners_guide_v1.pdf [in English].
8. System domoticz . *domoticzfaq.ru*. Retrieved from <https://domoticzfaq.ru/o-системе-domoticz/> [in Ukrainian].
9. Domoticz api/json url's. (2020). *domoticz.com*. Retrieved from https://www.domoticz.com/wiki/domoticz_api/json_url%27s [in English].
10. Ho, S. & Harrop, R. (2012). Pro spring 3 . United Kingdom: apress [in English].
11. Bloch, J. (2018). *Effective java third edition*. Retrieved from <https://kea.nu/files/textbooks/new/effective%20java%20%282017%2c%20addison-wesley%29.pdf> [in English].
12. Budai, A. (2012). *Dyzajn-patery – prosto, iak dveri [Design patterns — simple as doors]* . Retrieved from https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/632/mod_resource/content/1/designpatterns_andriy_buday.pdf [in Ukrainian].

Roman Minailenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olexandp Dreev**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oksana Konoplitcka-Slobodenyk**, Lecturer, **Vitalij Reznichenko**, Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Application of Raspberry Pi microcontroller for management and monitoring of IoT Systems

The article considers the issue of using the Raspberry Pi microcontroller to manage and monitor IoT elements. It is shown that currently there is a sufficiently large number of objects on the market that can be automated and many companies that offer different options to meet the needs of the client. There is also a worldwide demand for automation and remote control of various objects.

Moreover, the need for automation can arise not only at enterprises with multi-thousand budgets, but also at ordinary consumers who need to be offered alternative developments that would be much cheaper and easier to operate. After a while, IoT-based technologies will be widely used in almost all production enterprises. The creation of control and monitoring systems for Internet of Things elements is a topical issue, as a large number of devices capable of exchanging data without human intervention are appearing, both in everyday life and in industry.

Therefore, the purpose of this article is to research means for building IoT and to determine methods of managing and monitoring IoT elements using the example of using a Raspberry Pi microcontroller

The article analyzes the components of the IoT system and proposes a monitoring and control system for its components based on the Raspberry Pi microcontroller. Such a system can monitor the state of the

sensors via the Internet, when information updates on the web server are read according to the developed algorithm provided in the Raspberry Pi, and then the system responds to certain instructions with a high degree of information protection. The user can directly log in and interact with the embedded device in real time.

Using the Raspberry Pi microcontroller allows you to provide all the requirements for building a control and monitoring system for IoT elements and is an affordable technical solution that can be used in almost all industries and home use.

The proposed system is energy efficient, intelligent, low cost, portable and high performance.

internet of things, microcontroller, network, control system

Одержано (Received) 18.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 629.331.064.5:330.341.1

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.19-27](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.19-27)

Т.В. Гайкова, доц., канд. техн. наук, **Д.М. Ковальчук**, асп., **Р.М. Гайков**, асп.
*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м Кременчук, Україна
e-mail: dimakovalb12@gmail.com*

Аналіз науково-технічних інновацій в галузі машинобудування з виявленням закономірності впливу технологічних параметрів

У статті розглянуто виявлення закономірності впливу технологічних параметрів на неоднорідність інтенсивності деформації та опору матеріалу пластичному деформуванню у стінці деталі при витяжці прямокутних деталей із біметалів. При розробці технологічного процесу отримання виробів з шаруватих металів з попереднім зчепленням шарів необхідно враховувати пошарові деформації, їх залежності від параметрів процесів формозміни, їх механічні властивості, а також вплив термомеханічних параметрів обробки на міцність з'єднання складових.

біметал, витяжка, анізотропний матеріал, заготовка, деформація, напруження, механічні властивості

Постановка проблеми. На основі аналізу науково-технічної інформації встановлено, що шаруваті метали (біметали) – один із найсучасніших та найперспективніших матеріалів, що застосовується у галузі машинобудування та народного господарства. Застосування біметалів дозволяє досягти значної економії коштів, отримати матеріали, що володіють унікальними властивостями, підвищити ефективність виробництва і конкурентоспроможність широкого класу деталей і обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню процесів деформування різнорідних металів присвячені роботи Стеблюка В. І., Холявіка О. В., Драгобецького В. В., Загорянського В. Г., Тітова В. А. [1-3], в яких авторами, в основному, розглядалися можливості отримання композиційних матеріалів і залишилися недостатньо вивченими питання деформаційних впливів на структуру та властивості шаруватих металів.

Найбільш складна операція обробки шаруватих металів тиском – витяжка, яка широко застосовується для отримання багатьох деталей (днищ, склянок тощо). Побудова теоретичних основ процесу витяжки шаруватих металів, деформування монометалів, локальної формозміни дозволить вибудувувати технологію отримання виробів більш продуктивно та якісніше, уникаючи теоретичних помилок планування процесів, як це неодноразово вказувалося у роботах [4-5]. При пластичній деформації в шарах композиції виникають зони з різнозначними внутрішніми напруженнями, які можуть призвести до утворення складок, розривів та розшарування матеріалу готового виробу [6]. Так, наприклад, шаруваті метали, які отримані зварюванням вибухом, мають суттєву анізотропію механічних властивостей.

Наведені в роботі [7] вирази для визначення кінематики перебігу матеріалу, напруженого та деформованого станів в осередку пластичної деформації дозволили оцінити вплив технологічних параметрів на неоднорідність інтенсивності деформації та опору матеріалу пластичному деформуванню у стінці деталі при витяжці товстостінних вісесиметричних заготовок з анізотропних матеріалів.

Зарубіжний науковець Тенкхофф зазначає [8], що витяжку застосовують при виготовленні прямокутних деталей з шаруватих матеріалів, які мають достатню пластичність в холодному стані. Витяжка дозволяє отримувати деталі, що мають відносно точні розміри і високі властивості міцності, що в два-три рази перевищують міцність вихідного матеріалу. Це забезпечується зміцненням металу при деформуванні у поєднанні з відповідною термічною обробкою. Процеси пластичного деформування прямокутних анізотропних заготовок (вісесиметричний напружений та деформований стан) мало вивчені.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз методів визначення напруженого стану заготовки з неоднорідними механічними характеристиками в процесі пластичної деформації та визначення напружено-деформованого стану при витяжці прямокутних деталей із біметалів.

Виклад основного матеріалу. Середовище застосування шаруватих металів досить велике, що дозволяє не тільки підвищити надійність і довговічність великого класу деталей і обладнання, але і значно скоротити витрати на їх виготовлення в результаті економії дорогих кольорових металів, крім того, використання шаруватих композицій сприяє розробці більш досконалих конструкцій машин, приладів, апаратів.

Міцний зв'язок між шарами, що перешкоджає взаємному зміщенню частинок металу на межі розділу шарів, істотно впливає на характер деформованого стану. При цьому деформації шарів більш рівномірні, ніж за відсутності міжшарового зв'язку. Таким чином, при розробці технологічного процесу отримання виробів з біметалів з попереднім зчепленням шарів необхідно враховувати пошарові деформації, їх залежності від параметрів процесів формозміни. Тому при створенні технологічних процесів обробки шаруватих металів тиском необхідно знати їх механічні властивості, а також вплив термомеханічних параметрів обробки на міцність з'єднання складових.

Основними операціями для надання заготовці форми готового виробу в листовому штампуванні є згинання та витяжка. Граничні радіуси згинання залежать від пластичних властивостей композиції та характеру зміни її механічних властивостей у процесі вигину. При занадто малому радіусі вигину може статися руйнування матеріалу, а при великому радіусі виникають тільки пружні деформації обох шарів або окремо взятого покриття. Однак слід враховувати, що згинання деталей відповідального призначення, для яких за умовами міцності конструкцій не допускається зниження механічних властивостей матеріалу, повинно проводитися на радіуси не менше 9-ти товщин листа [1]. При згинанні на менші радіуси для відновлення механічних властивостей деталі повинні піддаватися відпустці при температурі 640-660 °С і охолодженню після відпуску на повітрі. У відповідальних деталях без подальшої термічної обробки допускається зменшувати тільки радіуси відгинання фланців (з урахуванням місцевого характеру деформації) до двох товщин листа при товщині < 10 мм і до п'яти товщин листа при < 15 мм. Рівень зміни механічних властивостей при холодному згинанні біметалів залежить від відносного радіусу згинання і не залежить від способу її виконання: у вальцях, на гідравлічному пресі або листозгинальному верстаті типу ЛЗВ. При відносному радіусі > 9 мм механічні властивості сталі знижуються в межах, що задовольняють вимогам технічних умов.

Витяжка, будучи складним процесом для аналізу монометалів, ускладняється для багат шарових металів ще більше, оскільки потрібно враховувати неоднорідну деформацію шарів композиції, а також зміцнення та анізотропію.

Листовий біметал, що піддається плоскому деформуванню, як правило, має анізотропію, неоднорідність механічних властивостей, обумовлену маркою матеріалу і технологічними режимами його отримання.

Для врахування впливу неоднорідності механічних властивостей багат шарової заготовки користуються умовою плинності Мізеса – Хілла – Ольшака для анізотропного неоднорідного матеріалу [9]:

$$K_{23}(x, y, z)(\sigma_y - \sigma_z)^2 + K_{31}(x, y, z)(\sigma_z - \sigma_x)^2 + K_{12}(x, y, z)(\sigma_x - \sigma_y)^2 + K_{44}(x, y, z)\tau_{yz}^2 + K_{55}(x, y, z)\tau_{zx}^2 + K_{66}(x, y, z)\tau_{xy}^2 = 1, \quad (1)$$

де K – функції координат точок тіла, що характеризують неоднорідність та анізотропію;

x, y, z – основні осі анізотропії;

$\sigma_{i,j}$ – компоненти напруги у основних осях анізотропії.

Приймається асоційований закон течії [9] де вважається, що функція плинності збігається з пластичним потенціалом, встановлюється зв'язок між швидкостями деформації і напруженнями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \lambda [K_{12}(x, y, z)(\sigma_x - \sigma_y) + K_{31}(x, y, z)(\sigma_x - \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \lambda [K_{23}(x, y, z)(\sigma_y - \sigma_z) + K_{12}(x, y, z)(\sigma_y - \sigma_x)], \\ \varepsilon_z &= \lambda [K_{31}(x, y, z)(\sigma_z - \sigma_x) + K_{23}(x, y, z)(\sigma_z - \sigma_y)] \end{aligned} \quad (2)$$

де $\varepsilon_{i,j}$ – компоненти швидкостей деформацій;

λ – коефіцієнт пропорційності.

У разі плоскої деформації. З виразу (2) можна визначити:

$$\sigma_z = \frac{K_{31}(x, y)\sigma_x + K_{23}(x, y)\sigma_y}{K_{31}(x, y) + K_{23}(x, y)}. \quad (3)$$

Умова плинності у разі плоскої деформації та дотичних напружень запишеться у вигляді:

$$K(x, y) \times [K_{23}(\sigma_y - \sigma_z)^2 + K_{31}(\sigma_z - \sigma_x)^2 + K_{12}(\sigma_x - \sigma_y)^2] = 1. \quad (4)$$

Її можна привести до вигляду:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4(1-c)\tau_{xy} = 4(1-c)T^2(x, y), \quad (5)$$

де c – характеристика анізотропії тіла за умов плоскої деформації;

$T(x, y)$ – межа плинності при зрушенні стосовно до головних осей анізотропії. І вирішуючи умови рівноваги для плоского напруженого стану, отримати рівняння для встановлення поля напруження:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \sigma + T(x, y) \left(\frac{1-c}{1-c \cdot \sin^2 2\phi} \right)^{1/2} \cdot \cos 2\phi \\
 \sigma_y &= \sigma - T(x, y) \left(\frac{1-c}{1-c \cdot \sin^2 2\phi} \right)^{1/2} \cdot \cos 2\phi \\
 \tau_{xy} &= T(x, y) \left(\frac{1-c}{1-c \cdot \sin^2 2\phi} \right)^{1/2} \cdot \sin 2\phi \\
 \sigma &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

де ϕ – кут між напрямком першої головної напруги та віссю X .

Використовуючи наведену умову плинності, рівняння рівноваги і задаючись характеристикою анізотропії тіла в умовах плоскої деформації можна визначити величину напруження. Однак дана методика визначення поля напруження і деформацій не враховує геометричних характеристик вогнища деформації та технологічних умов формозміни. Неясність у визначенні параметрів анізотропії і кута між напрямком першої головної напруги і віссю X не дає можливості використовувати її в технологічних розрахунках. Тому необхідно зробити нахил у бік експериментально-теоретичних методів досліджень для визначення механічних характеристик біметалів з подальшим їх використанням у виробничих розрахунках.

Деталі коробчастої, прямокутної у плані форми отримали широке застосування в машинобудуванні, автомобілебудуванні, літакобудуванні, при виготовленні різних виробів в електротехніці та енергетиці. В основному вони виготовляються операціями витяжки з листового матеріалу, який має кілька шарів металів з різними механічними характеристиками. За одну операцію витяжки можна отримати відносно неглибокі порожнисті деталі, оскільки при збільшенні глибини діючі зусилля зростають настільки, що ділянки металу, навантажені силами, що розтягують, руйнуються в процесі деформування витяжкою. Тому при виготовленні глибоких порожніх деталей виникає необхідність у поділі процесу витяжки на кілька операцій з тим, щоб уникнути перенапруження металу. Процеси витяжки коробчастих деталей вивчені і освітлені в спеціальній літературі досить широко і детально, але із застосуванням нових матеріалів і методів поєднання операцій виникає необхідність у доопрацюванні математичних моделей деформування, наприклад, двошарових металів з урахуванням нерівномірності деформацій за шарами [10].

Для детального аналізу напружено-деформованого стану заготовки в процесі витяжки необхідно розрізняти форму та геометричні співвідношення коробчастих деталей:

- а) з прямолінійними стінками з опуклими закругленнями на кутах – квадратні та прямокутні;
- б) з поєднанням прямолінійних стінок з опуклими і увігнутими закругленнями;
- в) з криволінійними опуклими чи увігнутими стінками – овальні, еліптичні тощо.
- д) деталі, що мають одну вісь симетрії або асиметричні.
- г) деталі, що мають неоднакову, заздалегідь задану товщину на різних ділянках.

Залежно від форми деталі формозміна заготовки є процесом глибокої витяжки в чистому вигляді, або є поєднанням витяжки із згинанням.

При витяжці деталей коробчастої форми вогнище пластичної деформації знаходиться в кутових ділянках фланця, воно також охоплює зону сполучення фланця і бічних стінок. Напружений стан кутової ділянки фланця – плоский (стисло-

розтягнутий), деформований стан – об’ємний. Стінки деталі відчувають складний і нерівномірний напружено-деформований стан: стиск уздовж контуру і розтяг по висоті (рис. 1). Чим вище деталь, тим характер розподілу напружень і деформацій більш нерівномірний. При витяжці деталей коробчастої форми в кутових і криволінійних ділянках фланця виникають не тільки нормальні напруження, що діють у радіальному та окружному напрямках, але і відносні напруження, які діють у напрямках, ортогональних напрямку нормальних напружень (рис. 1). Ці дотичні напруження виникають внаслідок відсутності осової симетрії деформування, отже, нерівномірного розподілу деформацій за контуром деталі. На бісектрисі кутової ділянки дотичні напруження відсутні (у зв’язку з тим, що це вісь симетрії даної ділянки), а в місці сполучення криволінійної і прямолінійної ділянок контуру досягають найбільшого значення [10].

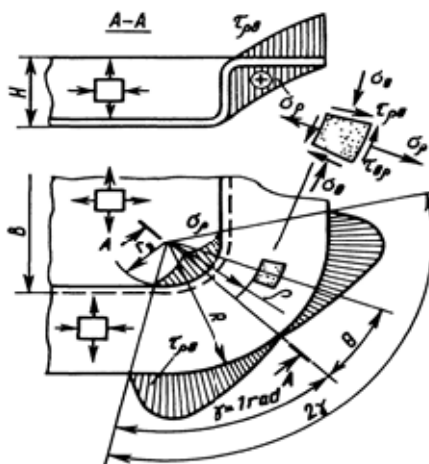


Рисунок 1 – Епюри напруги у фланці коробчастої деталі на першому переході витяжки

Джерело: [10]

Внаслідок суцільності металу дотичні напруження поступово спадають у двох взаємно протилежних напрямках: до бісектриси кута 2γ (рис. 1) і в напрямку прямолінійних ділянок контуру. Дотичні напруження змінюються і по ширині фланця, збільшуючись у міру наближення до периферійної його частини. Таким чином, дотичні напруження змінюються вздовж двох координат – ρ і θ (рис. 1). У роботі [10] наведена формула для визначення радіального напруження розтягу:

$$\sigma_{\rho} = \left[\frac{\sigma_s}{\gamma\sqrt{3}} \right] \left[\ln \frac{R}{\rho} - \theta^2 \right] + \frac{\mu Q}{\pi R s}, \quad (7)$$

де σ_{ρ} – меридіональне напруження розтягу;

σ_s – межа плинності металу;

Q – зусилля притиску заготовки.

Аналіз цієї формули показує, що σ_{ρ} збільшується зі зменшенням ρ і θ . При $\rho = r_y$ і $\theta = 0$ радіальне напруження розтягу досягає максимуму:

$$\sigma_{\rho} = \left[\frac{\sigma_s}{\gamma\sqrt{3}} \right] \left[\ln \frac{R}{r_y} - \theta^2 \right] + \frac{\mu Q}{\pi R s}. \quad (8)$$

Експериментально встановлено [6], що кут γ , що визначає протяжність вогнища пластичної деформації, може бути прийнятий рівним одному радіану: $\gamma = 1$ рад. У

цьому випадку максимальне за осередком деформації радіальне напруження розтягу, буде дорівнювати

$$\sigma_{\rho} = \left[\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \right] \left[\ln \frac{R}{r_y} \right] + \frac{\mu Q}{\pi R s} \quad (9)$$

Порівнюючи отриманий результат з виразом для витяжки порожнистої циліндричної заготовки було встановлено, що при витяжці коробчастих деталей напруження $\sigma_{\rho \max}$ на бісектрисі кута 2γ в 1,73 рази менше, ніж максимальне радіальне напруження на розтяг, що виникає при витяжці циліндричних деталей. Зазначене пояснюється розвантажувальною дією дотичних напружень, що виникають внаслідок відсутності осьової симетрії деформування при витяжці коробчастих деталей і сприятливого напрямку цих напружень до центру криволінійної ділянки контуру на межі зон вигину та витяжки. Цей висновок добре підтверджується практикою – гранично допустимий ступінь деформації при витяжці низьких коробчастих деталей приблизно в 1,5-2 рази вище, ніж при витяжці циліндричних деталей.

Внаслідок неоднакових умов деформування на різних ділянках контуру, а також анізотропії механічних властивостей матеріалу заготовки висота коробчастих деталей ще більш нерівномірна, ніж висота вісесиметричних деталей, отриманих витяжкою. Тому в технологічному процесі виготовлення таких деталей передбачають обрізання нерівного краю. Припуск на обрізання залежить від відносної висоти деталі. Чим вона більша, тим більший припуск. Внаслідок цього витягнуті деталі (або напівфабрикати) мають нерівномірну висоту: на кутових ділянках висота більша, а на прямолінійних – менше. Крім того, нерівномірні за контуром матриці умови втягування заготовки викликають нерівномірний напружений стан стінок деталі, що може призвести до її руйнування.

При витяжці в кутових ділянках контуру деталі відбувається природне потовщення фланця, це явище враховується при визначенні зазору між пуансоном і матрицею штампу для витяжки: у кутових ділянках зазор повинен бути більшим, ніж на прямолінійних ділянках контуру матриці. Відповідно до практичних даних на прямолінійних ділянках контуру зазор між пуансоном і матрицею $z = 1,25s$ і на криволінійних ділянках $z = (1,3-1,4)s$. Напрямок зазору байдужий на всіх операціях витяжки, окрім останньої. При витяжці деталей з необхідними зовнішніми розмірами зазор призначають зменшуючи розміри пуансона, при витяжці деталей з необхідними внутрішніми розмірами – збільшуючи розміри матриці. Для створення хоча б приблизно однакових умов втягування заготовки в матрицю по всьому контуру на прямолінійних її ділянках штучно збільшують опір втягування заготовки шляхом використання спеціальних перетяжних ребр, які служать своєрідним гальмом при переміщенні заготовки щодо матриці. Перетяжні ребра застосовують тільки при необхідності, оскільки їх установка ускладнює штамп і збільшує його вартість.

Ще більшу нерівномірність деформацій викликає витяжка коробчастих деталей з біметалів. На загальну знакозмінність напружень накладається різна величина деформацій шарів біметалічної заготовки, що викликає вигин і короблення прямолінійних частин напівфабрикату, і тому, неможливість отримання якісного виробу. На основі аналізу напружено-деформованого стану заготовки в процесі витяжки біметалу запропоновані такі положення: якщо механічні властивості шарів металу не відрізняються – двошаровий метал поводить, як одношаровий, то не змінюється співвідношення товщин двошарового металу після втягування; якщо механічні властивості шарів відрізняються, тоді змінюється співвідношення товщин двошарового металу після втягування. Так при зменшенні відношення σ_{s1}/σ_{s2} зменшується на виході товщина першого шару, що має менші механічні властивості;

співвідношення товщини після витягування залежить також від початкового відношення товщин металу.

Висновки. Наведені вище методики визначення поля напружень і деформацій не враховують геометричних характеристик вогнища деформації та технологічних умов формозміни. Неясність у визначенні параметрів анізотропії та кута між напрямком першого головного напруження та віссю X не дає можливості використовувати їх у технологічних розрахунках. Тому необхідно зробити нахил у бік експериментально-теоретичних методів досліджень для визначення механічних характеристик біметалів з подальшим їх використанням у виробничих розрахунках.

На основі проведеного аналізу напружено-деформованого стану заготовки при витяжці коробчастих деталей визначено наступні методи та прийоми для отримання якісних деталей витяжкою та економії матеріалу: застосовувати метали з близькими механічними властивостями; прагнення до збільшення кривизни кутових зон заготовки; проводити розрахунок розмірів заготовки для витяжки із залученням сучасного математичного апарату (метод потенціалу); замість гальмівних ребр застосовувати гальмівні середовища; впливати на осередок деформації, збільшуючи дію розвантажувально-дотичних напружень.

Список літератури

1. Стеблюк В. І., Холявік О. В. Побудова контуру заготовки на основі математичної моделі процесу витягування порожнистих виробів коробчастої форми. *Збірник наукових праць. Обробка металів тиском*. 2009. №1 (20). С. 63–67.
2. Загорянський В. Г., Драгобецький В. В., Костін В. В. Про випробування мідно-алюмінієвих композицій, отриманих плакуванням вибухом. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2012. №5. С. 67–71.
3. Тітов В. А., Борис Р. С., Тривайло М. С. Напрямки розвитку способів виготовлення біметалевих трубчастих елементів з різнорідних матеріалів витягуванням. *Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут, серія Машинобудування*. 2009. №56. С. 154–159.
4. Miyazaki S., Kumai S., Sato A. Plastic deformation of Al–Cu–Fe quasicrystals embedded in Al₂Cu at low temperatures. *Mater Sci Eng*. 2005. A 300–5. P. 400–401.
5. Пузир Р. Г. Пластична деформація матеріалів, що мають різні механічні властивості. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: зб матер. Всеукр. наук.-практ. конф. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2012. С.137–139.
6. Гайкова Т. В. Кінцева-елементна модель деформування біметалічної заготовки при отриманні витяжкою коробчастих деталей. *Вісник національного технічного університету ХПІ*. 2016. № 30 (1202). С. 21–25.
7. Козлов Л. Г., Сивак І. О., Шевчук Є. І., Ковальчук В. А. Ротаційна витяжка вісесиметричних деталей з використанням мехатронного приводу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 1. С. 93-98.
8. Tenckhoff E. Review of the mechanism of deformation, texture and mechanical anisotropy in materials during drawing with thinning of thick-walled axisymmetric workpieces. *Journal of ASTM International*. 2005. Vol. 2. P. 1.
9. Аніщенко А. С. Прогресивні технологічні рішення в обробці металів тиском: навч. посіб. Маріуполь: ДВНЗ ПДТУ, 2013. 180 с.
10. Холявік О. В., Меленчук Ю. П., Вишневський П. С., Орлюк М. В. Порівняння параметрів НДС при витягуванні квадратних у плані коробчастих виробів із заготовок, розрахованих інженерним методом та методом потенціалу. *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*: зб. матеріалів V Міжнар. наук.-техн. конф. Київ: НТУУ КПІ, 2014. С. 132.

References

1. Stebliuk, V.I., & Holiavik, O.V. (2009). Pobudova konturu zahotovky na osnovi matematychnoi modeli protsesu vytiahuvannya porozhnystrykh vyrobiv korobchastoi formy [Building a workpiece contour based on a

- mathematical model of the process of drawing hollow box-shaped products]. *Zbirnyk naukovykh prats. Obrobka metaliv tyskom – Collection of scientific works. Pressure treatment of metals, 1*, 63–67 [in Ukrainian].
2. Zahorianskyi, V. H., Drahobetskyi, V. V. & Kostin, V. V. (2012). Pro vyprobuvannya midno-aliuminiievyykh kompozytsii, otrymanykh plakuvanniam vybukhom. [On the testing of copper-aluminum compositions obtained by cladding by explosion]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KrNU*, 5, 67-71 [in Ukrainian].
 3. Titov, V.A., Borys, R.S. & Tryvailo, M.S. (2009). Napriamky rozvytku sposobiv vyhotovlennia bimetalievyykh trubchastykh elementiv z riznorodnykh materialiv vytyahuvanniam [Directions for the development of methods of manufacturing bimetallic tubular elements from dissimilar materials by drawing]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy Kyivskiy politekhnichnyi instytut, seriia Mashynobuduvannia - Bulletin of the National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute, Mechanical Engineering series*, 56, 154–159 [in Ukrainian].
 4. Miyazaki, S., Kumai, S., Sato, A. (2005). Plastic deformation of Al–Cu–Fe quasicrystals embedded in Al₂Cu at low temperatures. *Mater Sci Eng. A* 300–5. P. 400–401 [in English].
 5. Puzyr, R.H. (2012). Plastychna deformatsiia materialiv, shcho maiut rizni mekhanichni vlastyvoli. [Plastic deformation of materials with different mechanical properties.]. Modern power plants on transport and technologies and equipment for their maintenance: *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia (Kherson) – All-Ukrainian Science and Practice Conf, (pp.137–139)* . Kherson : Khersonska derzhavna morskha akademiia [in Ukrainian].
 6. Haikova T.V. (2016). Kintseva-elementna model deformuvannia bimetalichnoi zahotivli pry otrymanni vytyazhkoiu korobchastykh detalei [Finite-element model of deformation of a bimetallic billet when boxed parts are produced by a drawing machine]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI – Bulletin of the KhPI National Technical University*, 30 (1202), 21–25 [in Ukrainian].
 7. Kozlov, L.H., Syvak, I.O., Shevchuk, Ye.I. & Kovalchuk, V.A. (2017). Rotatsiina vytyazhka visesymetrychnykh detalei z vykorystanniam mekhatronnoho pryvodu [Rotary extraction of axisymmetric parts using a mechatronic drive]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 1, 93-98 [in Ukrainian].
 8. Tenckhoff, E. (2005). Review of the mechanism of deformation, texture and mechanical anisotropy in materials during drawing with thinning of thick-walled axisymmetric workpieces. *Journal of ASTM International*, Vol. 2, P. 1 [in English].
 9. Anishchenko, A.S. (2013). *Prohresyvni tekhnologichni rishennia v obrobsi metaliv tyskom [Advanced technological solutions in metal forming]*. Mariupol: DVNZ PDTU [in Ukrainian].
 10. Kholiavik, O.V., Melenchuk, Yu.P., Vyshnevskiy, P.S. & Orliuk, M.V. (2014). Porivniannia parametriv NDS pry vytyahuvanni kvadratnykh u plani korobchastykh vyrobiv iz zahotovok, rozrakhovanykh inzhenernym metodom ta metodom potentsialu [Comparison of VAT parameters when drawing square box products from blanks calculated by the engineering method and the potential method]. Theoretical and practical problems in the processing of materials by pressure and the quality of professional education: *V Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (Kyiv) – V International Scientific and Technical Conference (p.132)*. Kyiv: NTUU KPI [in Ukrainian].

Tetiana Haikova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Kovalchuk**, post-graduate, **Roman Haikov**, post-graduate
Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Analysis of Scientific and Technical Innovations in the Field of Mechanical Engineering with the Identification of Regularities in the Influence of Technological Parameters

Based on the analysis of scientific and technical information, it established that today layered metals are one of the most modern and promising materials used in all branches of mechanical engineering and national economy. The use of bimetals allows you to achieve significant cost savings, obtain materials with unique properties, increase production efficiency and competitiveness of a wide class of parts and equipment.

The purpose of the article is to analyze the methods of determining the stress state of a workpiece with heterogeneous mechanical characteristics in the process of plastic deformation and to determine the stress-strain state when drawing rectangular parts from bimetals.

As a result, of unequal deformation conditions in different parts of the contour, as well as anisotropy of the mechanical properties of the workpiece material, the height of box-shaped parts is even more uneven than the height of axisymmetric parts obtained by drawing. Therefore, in the manufacturing process of such parts, cutting of the uneven edge provided. The trimming allowance depends on the relative height of the part. The bigger it is, the bigger the allowance.

Since the flange naturally thickens during drawing in the corner sections of the part contour, this phenomenon taken into account when determining the gap between the punch and the die of the drawing die: in the corner sections, the gap should be greater than in the straight sections of the die contour.

Extrusion of box-shaped parts from bimetal causes even greater unevenness of deformations. A different amount of deformation of the layers of the bimetallic work piece imposed on the general sign change of the voltages, which causes bending and warping of the rectilinear parts of the semi-finished product, and therefore, the impossibility of obtaining a high-quality product. Based on the analysis of the stress-strain state of the workpiece in the process of drawing bimetal. The following provisions are proposed: if the mechanical properties of the metal layers do not differ - the two-layer metal behaves like a single-layer, then the ratio of the thicknesses of the two-layer metal does not change after drawing; if the mechanical properties of the layers differ, then the ratio of the thicknesses of the two-layer metal changes after drawing. Thus, when the ratio σ_{s1}/σ_{s2} decreases, the thickness of the first layer, which has lower mechanical properties, decreases at the output; the thickness ratio after drawing also depends on the initial ratio of metal thicknesses.

Based on the analysis of the stress-strain state of the work piece during the extraction of box parts, the following methods and techniques have been determined for obtaining high-quality parts by extraction and saving material: use metals with similar mechanical properties; the desire to increase the curvature of the corner zones of the work piece; to calculate the dimensions of the work piece for the hood with the involvement of modern mathematical apparatus (potential method); use brake media instead of brake ribs; affect the center of deformation, increasing the effect of unloading tangential stresses.

bimetal, drawing, anisotropic material, workpiece, deformation, stress, mechanical properties

Одержано (Received) 26.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 04.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 007.52

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.27-33](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.27-33)

М.О. Годунко, доц., канд. техн. наук, **О.А. Кислун**, доц., канд. техн. наук, **В.А.Мажара**, доц., канд. техн. наук, **В.К. Щербина**, асп., **Р.А. Кравченко**, асп., **В.В. Ключкін**
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: maksimgodunko83@gmail.com

Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого захватного пристрою

Виконано обґрунтування силового розрахунку важільних захватних пристроїв роботів із врахуванням їх конструктивних параметрів та умов функціонування. Виведено рівняння для розрахунку сил затиску в захватному пристрої та на основі цих рівнянь побудовано залежності сил затиску від приведених умов. На основі побудованих залежностей зроблено висновки та надано відповідні рекомендації по виконанню та функціонуванню захватних пристроїв роботів.

захватні пристрої, сили затиску, промислові роботи, сумарні сили затиску

Постановка проблеми. Виходячи із основного цільового призначення промислових роботів, їх захватні пристрої повинні забезпечувати надійний затиск утримуваних ними деталей при різних напрямках і режимах їх руху та виконанні необхідних операцій (встановлення, з'єднання, запресовування деталей та ін.). Сам процес транспортування та позиціонування повинен здійснюватись з дотриманням наступних вимог: максимально- доцільною швидкістю або прискоренням; необхідною точністю; мінімальними силовими навантаженнями на захват та конструкцію робота; необхідною якістю виконання операції; мінімальними енергетичними потребами; дотриманням необхідних вимог по безпеці виконання операцій та ін.

© М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А.Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко, В.В. Ключкін, 2023

Окрім цього захватні пристрої роботів повинні бути достатньо універсальними, щоб мати можливість працювати з різними деталями за формою і розмірами, а також виконувати обслуговування різного обладнання, працюючи з різними пристроями і ін. Тому функціональні дослідження захватних пристроїв є достатньо важливими. Одним із напрямків таких досліджень є створення методики силових розрахунків з урахуванням вище розглянутих умов, тому поставлена задача є актуальною на сьогоднішній день.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За період існування та розвитку промислової робототехніки питання силового розрахунку їх захватних пристроїв було завжди актуальним у зв'язку з тим, що це робочий орган, який постійно контактує з об'єктами виробництва різної форми, матеріалу та властивостей. У процесі маніпулювання об'єктами виробництва, вони не мають бути пошкоджені, при цьому цикл роботи робота також має бути точно відпрацьований за певний проміжок часу згідно такту виробництва. Найбільш ґрунтовно всі ці питання розглядалися в дослідженнях І.І. Павленка [1, 4], Shimon Y. Nof, G.J. Monkman [3], Я.І. Проць [2] та ін. Особливу увагу силам захватних пристроїв приділено саме в працях Павленка І.І. Саме ці дослідження взято за основу ідеї обґрунтування умов функціонування захватних пристроїв та створення методики, різних підходів до силового розрахунку із подальшим його використанням у конструюванні цих виконавчих модулів, а також у корегуючи програмах роботи промислового робота.

Постановка завдання. Таким чином, метою наукової роботи є дослідження силових характеристик захватного пристрою промислового робота за різних умов його функціонування, виведення формул для визначення мінімально необхідних сил затиску деталі та побудова залежностей розрахованих сил від конструктивних характеристик захвату.

Виклад основного матеріалу. Варто зазначити, що актуальність даного питання на сьогоднішній день зростає в багато разів. Це пов'язано з використанням робототехніки не тільки на виробництві, а й у військових цілях. У машинобудівному виробництві використовуються промислові роботи (маніпулятори), які обслуговують основне технологічне обладнання [1, с.58], а у військовій справі - мобільні роботи із вбудованими маніпуляторами для взяття небезпечних предметів. Запропонована нами методика силового розрахунку полягає у визначенні мінімально необхідних сил затиску. Нижче приведено приклад розрахункової схеми (рис.1) та отриманих рівнянь для визначення мінімально необхідних сил затиску.

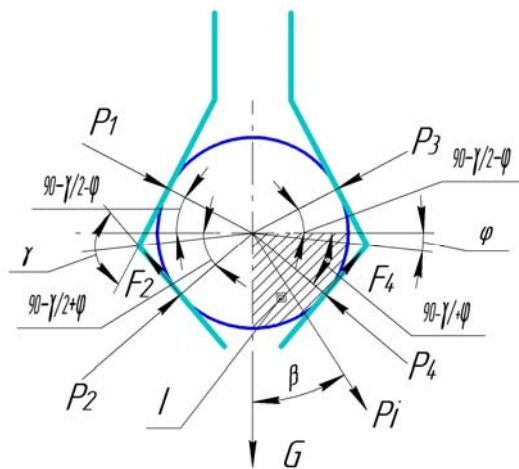


Рисунок 1 – Схема для розрахунку сил затиску заготовки

Джерело: розроблено автором

Розрахункова схема складається з урахуванням особливостей затиску захватом деталі, де вказуємо такі позначення: G – сила ваги деталі; P_i (I) – сила інерції; γ – кут призми; β – кут напрямку сили інерції; φ – кут розміщення вершини призми; P_1, P_2, P_3, P_4 – мінімально необхідні сили затиску деталі. За умову приймаємо, що сила інерції менше або дорівнює силі ваги ($P_i \leq G$).

Для подальших розрахунків складаємо рівняння рівноваги на вісь "X":

$$\sum X = 0;$$

$$P_1 x \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) + P_2 x \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) - P_3 x \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) - P_4 x \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) + P_i \sin \beta = 0 \quad ; \quad (1)$$

Так як $P_1 x$ та $P_2 x$ дорівнюють 0, отримаємо:

$$\begin{aligned} -P_3 x \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) - P_4 x \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) &= -P_i \sin \beta \\ \text{або } P_3 x \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) + P_4 x \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) &= P_i \sin \beta \end{aligned} \quad (2)$$

За аксіомою паралелограма сил по теоремі синусів маємо:

$$\frac{P_3}{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)} = \frac{P_4}{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)} = \frac{R_2}{\sin(180 - \gamma)} \quad (3)$$

де R_2 – сумарна сила затиску, яка дорівнює:

$$R_2 = \sqrt{P_3^2 + P_4^2 + 2P_3P_4 \cos(180 - \gamma)} \quad (4)$$

де γ – кут призми губок захвата;

Вирішуючи рівняння (3) ми знаходимо що:

$$P_3 x = \frac{P_4 \sin(90 - \gamma/2 + \varphi)}{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)} \quad (5)$$

Підставимо формулу (5) в формулу (2) отримаємо

$$\frac{P_4 x \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) \cos(90 - \gamma/2 - \varphi)}{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)} + P_4 y \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) = P_i \sin \beta$$

$$\frac{P_4 x [\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) \sin(90 - \gamma/2 - \varphi)]}{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)} = P_i \sin \beta$$

$$\frac{P_4 x \sin(180 - \gamma)}{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)} = P_i \sin \beta$$

$$P_4 x = (P_i \sin \beta) \frac{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)}{\sin(180 - \gamma)}$$

Так як $P_4 = P_4 x + P_4 y$ то отримаємо:

$$P_4 = (P_i \sin \beta) \frac{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)}{\sin(180 - \gamma)} + \frac{P_i \cos \beta + G}{2[(\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 + \varphi))]}$$

Вирішуючи рівняння (3) ми знаходимо що:

$$P_{3x} = \frac{P_4x \sin(90 - \gamma/2 - \varphi)}{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)} \quad (6)$$

Підставимо формулу (6) в формулу (2) отримаємо:

$$\frac{P_{3x} \sin(90 - \gamma/2 - \varphi) \cos(90 - \gamma/2 + \varphi)}{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)} + P_{3x} \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) = P_i \sin \beta$$

$$\frac{P_{3x} [\sin(90 - \gamma/2 - \varphi) \cos(90 - \gamma/2 + \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 - \varphi) \sin(90 - \gamma/2 + \varphi)]}{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)} = P_i \sin \beta$$

$$\frac{P_{3x} \sin(180 - \gamma)}{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)} = P_i \sin \beta$$

$$P_{3x} = (P_i \sin \beta) \frac{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)}{\sin(180 - \gamma)}$$

Складаємо рівняння рівноваги на вісь "Y".

$$\sum Y = 0;$$

$$-P_1y \sin(90 - \gamma/2 - \varphi) + P_2y \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) - P_3y \sin(90 - \gamma/2 - \varphi) + P_4y \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + F_2 \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + F_4 \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) - P_i \cos \beta - G = 0; \quad (7)$$

де

γ – кут призми ;

β – кут напрямку сили інерції ;

φ – кут розміщення вершини призми ;

В точках контакту заготовки з губками захвата діє сила тертя F тертя, яка дорівнює :

$$F \text{ тертя} = f P_i; \quad (8)$$

де f – сила тертя губки захвата об деталь ;

P_i – нормальна сила для i – i точки контакту.

Так як P_1y та P_3y дорівнюють 0, та підставивши формулу 8 в формулу 7 отримаємо :

$$P_2y \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + P_4y \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + f P_2y \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + f P_4y \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) - P_i \cos \beta - G = 0;$$

Так як $P_2y = P_4y = P_y$ то отримаємо:

$$P_y [\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + f \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + f \sin(90 - \gamma/2 + \varphi)] = P_i \cos \beta + G$$

$$P_y [2 \sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + 2f \sin(90 - \gamma/2 + \varphi)] = P_i \cos \beta + G$$

$$P_y = \frac{P_i \cos \beta + G}{2 [\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 + \varphi)]} \quad \text{отримаємо:}$$

$$P_2y = P_4y = \frac{P_i \cos \beta + G}{2 [\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 + \varphi)]}$$

Отримаємо такі рівняння для розрахунку сил затиску:

$$P_1 = 0.$$

$$P_2 = \frac{P_i \cos \beta + G}{2[(\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 + \varphi))]}$$

$$P_3 = (P_i \sin \beta) \frac{\sin(90 - \gamma/2 + \varphi)}{\sin(180 - \gamma)}$$

$$P_4 = (P_i \sin \beta) \frac{\sin(90 - \gamma/2 - \varphi)}{\sin(180 - \gamma)} + \frac{P_i \cos \beta + G}{2[(\sin(90 - \gamma/2 + \varphi) + \cos(90 - \gamma/2 + \varphi))]}$$

Розглянемо на даному прикладі вплив конструктивних параметрів на сили затиску P_1, P_2, P_3, P_4 коли сила інерції у I квадранті.

Досліджуючи вплив конструктивних параметрів бачимо, що на сили затиску мають вплив такі кути: кут призми γ ; кут напрямку сили інерції β ; кут розміщення вершинки призми φ .

Приймаємо такі значення цих кутів:

- кут призми γ ($60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$);
- кут напрямку сили інерції β ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$);
- кут розміщення вершинки призми φ ($0^\circ, 5^\circ, 15^\circ$);

Для полегшення розрахунків приймаємо, що $P_i = 1$ та сила ваги також дорівнює $G = 1$, а коефіцієнт тертя $f = 0,12$. Розглянемо окремо вплив цих кутів на сили затиску захватного пристрою та будуємо графіки залежності сил затиску від кута призми γ , кута напрямку сили інерції β , кута розміщення вершинки призми φ .

Спочатку розглянемо вплив кута призми γ на сили затиску. Для цього розраховуємо сили затиску при таких значеннях кутів:

- кут призми γ ($60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$);
- кут напрямку сили інерції β ($0^\circ, 90^\circ$);
- кут розміщення вершинки призми φ ($0^\circ, 5^\circ$);

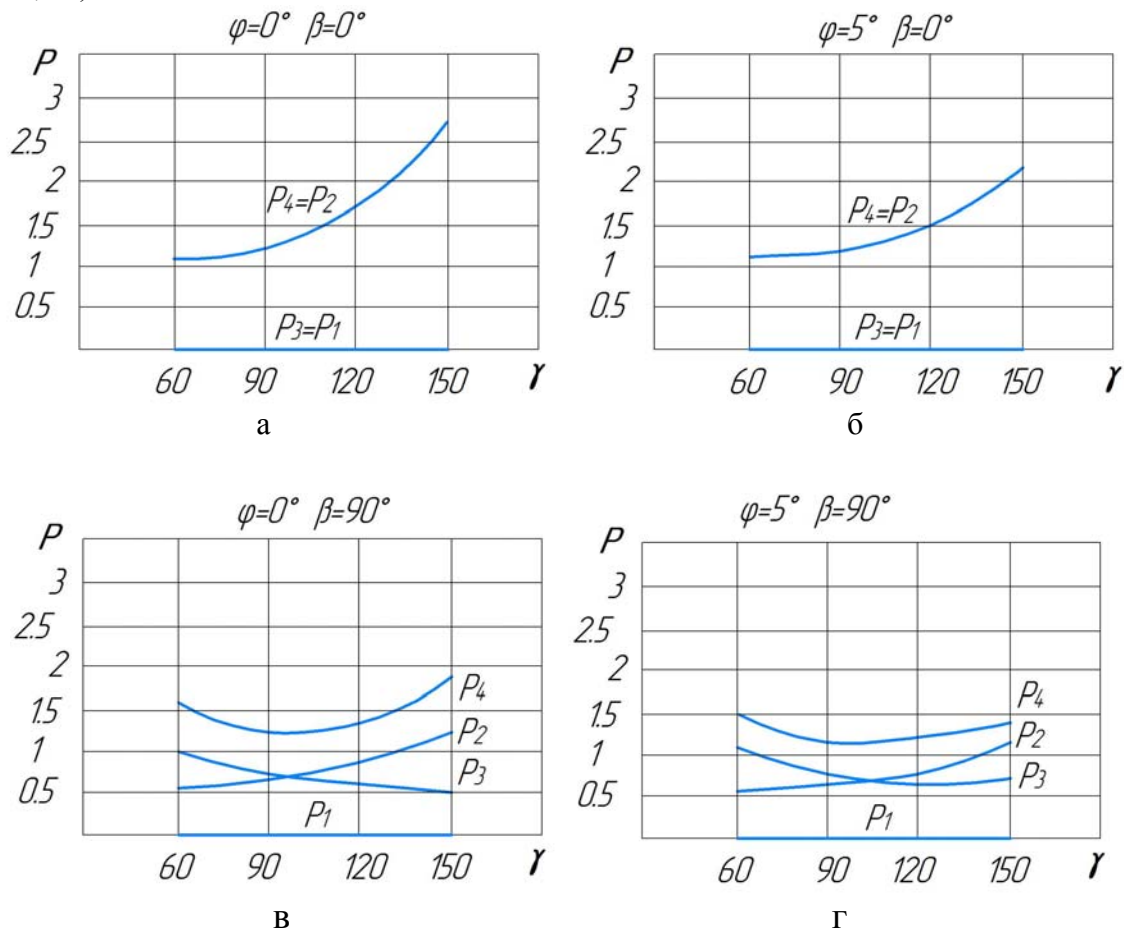
Результати розрахунку сил затиску приводимо в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку сил затиску за визначених умов

Значення кутів			Значення сил затиску		
φ	β	γ	P2	P3	P4
0°	0°	60°	1,1	0	1,1
		90°	1,25	0	1,25
		120°	1,7	0	1,7
		150°	2,7	0	2,7
5°	0°	60°	1,04	0	1,04
		90°	1,2	0	1,2
		120°	1,5	0	1,5
		150°	2,2	0	2,2
0°	90°	60°	0,53	1	1,53
		90°	0,63	0,71	1,34
		120°	0,83	0,58	1,41
		150°	1,33	0,52	1,85
5°	90°	60°	0,52	1,04	1,5
		90°	0,59	0,77	1,23
		120°	0,77	0,66	1,26
		150°	1,1	0,68	1,45

Джерело: розроблено автором

Будуємо графіки залежності сил затиску P_1, P_2, P_3, P_4 від кута призми γ (рис.2а, 2б, 2в, 2г).



а – вплив кута γ на сили затиску при $\varphi=0^\circ$ і $\beta=0^\circ$; б – вплив кута γ на сили затиску при $\varphi=5^\circ$ і $\beta=0^\circ$;
 в – вплив кута γ на сили затиску при $\varphi=0^\circ$ і $\beta=90^\circ$; г – вплив кута γ на сили затиску при $\varphi=5^\circ$ і $\beta=90^\circ$;

Рисунок 2 – Графіки впливу кута затискових призм γ на сили затиску P_1, P_2, P_3, P_4
 Джерело: розроблено автором

Висновки. Коли кут розміщення вершини призми буде дорівнювати $\varphi=0$, а кут $\beta=0$ то сили затиску зі збільшенням кута призми γ від 60° до 150° $P_4 = P_2$ будуть збільшуватися, $P_1=P_3=0$ (рис. 2,а), а тому кут призми γ необхідно вибирати в межах від 60° - 90° , збільшуючи кут напрямку сили інерції від 0 до 90° , сила P_2 буде збільшуватись, P_3 – зменшуватися, сила P_4 - буде збільшуватися, тому кут призми рекомендується вибирати від 90° - 120° (рис.2,в). Змінюючи кут розміщення вершинки призми, наприклад $\varphi=5^\circ$, бачимо, що зі збільшенням кута призми γ від 60° до 150° при $\beta=0$ сили $P_4= P_2$ будуть збільшуватися, $P_1=P_3=0$ (рис. 2, в), а тому кут призми γ необхідно вибирати в межах від 60° - 90° (рис. 2, в). Збільшуючи кут інерції β від 0 до 90° , сила P_2 буде збільшуватись, P_3 – буде зменшуватися, сила P_4 - буде збільшуватися, тому кут призми рекомендується вибирати від 90° - 120°

Список літератури

1. Павленко І.І., Годунко М.О. Захватні пристрої роботів: навч. посібн. Кіровоград: КНТУ, 2014. 367с.
2. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навч. посібн. Тернопільський державний технічний університет ім.І.Пулужа, 2008. 232с.

3. Robot Grippers. G.J. Monkman, S.Hesse, R.Steinmann, H.Schunk. Copyright 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
4. Павленко І.І. Промислові роботи та РТК: монографія . Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2016. 492с.

Referencis

1. Pavlenko, I.I. & Godunko. M.O. (2014). *Zakhvatni prystroi robotiv [Grippersofrobots]*. Kirovograd: KNTU [in Ukrainian].
2. Prots, Ya.I. (2008). *Zakhopliuval'ni prystroi promyslovykh robotiv [Grippers of industrial robots]*. Ternopol State Technical University named after I.Pulyuya, 232p. [in Ukrainian].
3. Robot Grippers. G.J. Monkman, S.Hesse, R.Steinmann, H.Schunk. (2007). Copyright 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim [in English].
4. Pavlenko, I.I. (2016). *Promyslovi roboty ta RTK [Industrialrobotsand RTC]*. Kropivnitsky: Publisher Lysenko V.F. [in Ukrainian].

Maksym Hodunko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Kyslun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vitalii Mazhara**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Shcherbyna**, post-graduate, **Roman Kravchenko**, post-graduate, **Vladyslav Klyushkin**, master student

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Development of the Method of Force Calculation of a Vertically Oriented Gripping Device

Based on the main purpose of industrial robots, their gripping devices must provide reliable clamping of the parts they hold in different directions and modes of their movement and perform the necessary operations (installation, connection, pressing of parts, etc.). The process of transportation and positioning itself must be carried out in compliance with the following requirements: the maximum appropriate speed or acceleration; necessary accuracy; minimal force loads on the robot grip and structure; the necessary quality of the operation; minimum energy requirements; compliance with the necessary requirements for the safety of operations, etc.

In addition, the gripping devices of robots should be versatile enough to be able to work with different parts in shape and size, as well as perform maintenance of different equipment, working with different devices, etc. Therefore, functional studies of gripping devices are quite important. One of the directions of such research is the creation of a methodology for force calculations taking into account the conditions discussed above, therefore the task is relevant today.

During the period of existence and development of industrial robotics, the issue of force calculation of their gripping devices has always been relevant due to the fact that this is a working body that is constantly in contact with production objects of various shapes, materials and properties. In the process of manipulating production objects, they must not be damaged, while the robot's work cycle must also be precisely worked out in a certain period of time according to the production cycle. All these issues were considered most thoroughly in the studies of I.I. Pavlenko [1, 4], Shimon Y. Nof, G.J. Monkman [3], Ya.I. Prots [2] and others. Particular attention was paid to the power of gripping devices in the works of I.I. Pavlenko. These studies are taken as the basis of the idea of substantiating the operating conditions of gripping devices and creating a methodology, different approaches to force calculation with its subsequent use in the design of these executive modules, as well as in the correcting programs of the industrial robot.

Thus, the purpose of the scientific work is to study the power characteristics of the gripping device of an industrial robot under different conditions of its operation, to derive formulas for determining the minimum necessary clamping forces of the part, and to build the dependence of the calculated forces on the design characteristics of the gripper.

It is worth noting that the relevance of this issue has increased many times today. This is due to the use of robotics not only in production, but also for military purposes. Industrial robots (manipulators) are used in the machine-building industry, which serve the main technological equipment, and in military affairs - mobile robots with built-in manipulators for taking dangerous objects. The method of force calculation proposed by us consists in determining the minimum necessary clamping forces.

gripping devices, clamping forces, industrial works, total clamping forces

Одержано (Received) 24.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 27.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.74:669.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.34-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42)

В.М. Кропівний, проф., канд. техн. наук, **М.В. Босий**, викл., **О.В. Кузик**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Кропівна**, доц., канд. техн. наук., **Л.А. Молокост**, викл.

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: bosiymv@ukr.net; kuzikov1985@gmail.com*

До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg»

У статті наведено результати аналізу закономірностей структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg». Розглянуто концепцію утворення графіту у високоміцному чавуні. Наведено схему формування структури високоміцного чавуну. Встановлено, що при модифікуванні розплаву чавуну в результаті істотного перерозподілу всіх розчинених у ньому елементів відбувається очищення рафінування від домішок (сірка, фосфор та ін.), що дозволяє отримувати структуру чавуну з кулястим графітом із застосуванням модифікаторів. Приведені діаграми системи «Fe-Si», «Mg-Si» та системи «Fe-Si-Mg» для розробки складу високоміцного чавуну. Аналіз даних приведених діаграм стану, показав, що всі сполуки елементів в складі сфероїдизуючих лігатур є легкоплавкими ($t_{пл} < 1300$ °C) по відношенню до температури розплаву чавуну. При кристалізації чавуну з виділенням аустеніту характерна пряма мікроліквація кремнію з коефіцієнтом розподілу менше одиниці, марганець більш рівномірно розподіляється в металі, а в рідку фазу лікують карбідостабілізуючі елементи.

високоміцний чавун, структуроутворення чавуну, кулястий графіт, вермикулярний графіт, флуктуація

Постановка проблеми. Перспективним видом чавуну для деталей машин є залізо – вуглецеві сплави з кулястою та вермикулярною формою графіту. Він є ефективним матеріалом, який застосовується для деталей машин, що зазнають досить високих статичних, ударних і циклічних навантажень та працюють в умовах тепломінів. З даних чавунів виготовляють колінчасті і розподільчі вали, головки блоків циліндрів, випускні колектори, блоки циліндрів, зубчасті колеса, гальмівні диски, корпуси турбокомпресорів та ін. [1].

Розкриття механізму процесів формування кулястого та вермикулярного графіту відкриває широкі можливості управління структурою і властивостями високоміцного чавуну та сприяє розробці ефективних технологічних процесів отримання литих виробів різного призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізико-механічні властивості високоміцних чавунів в значній мірі визначаються будовою графітної фази, формування якої пов'язане з різною морфологією її виділення з розплаву та аустеніту в залежності від умов кристалізації. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень сформульовано теорію неоднорідного розподілу вуглецю в залізкремністих розплавах [1 -7]. На основі цієї теорії зроблено припущення про утворення пересичених вуглецем локальних ділянок розплаву у вигляді вуглецевих кластерів (розмірами 10^{-6} – 10^{-7} см)

шляхом гомогенної флуктуації. Згідно гіпотези Жукова А.А. та Сніжного Р.Л. вуглецеві кластери мають аренову природу і складаються з бензольних кілець з 12 електронами атомів вуглецю і 6 електронами атомів заліза за структурою типу C_mFe [7]. Такі кластери, утворені в розплаві висхідної дифузії вуглецю, перетворюються на графіт шляхом спинодального розпаду розплаву у всьому обсязі без утворення зародків критичного розміру. Зазначається, що сиботаксична структура (C_mFe) утворюється в процесі асоціації та сольватації графітних кластерів. Внаслідок нестійкості графітні кластери, якщо вони не встигають розчинитися в розплаві, кристалізуються на неметалевих включеннях у вигляді графіту. При цьому процес можливого дорозчинення графітних комплексів відбувається по-атомно або цілими пінакоїдами (блоками) за механізмом Ребіндера П.А. та Щукіна О.Д. [7].

На думку Вертмана А.А. та Самаріна А.М. вуглець при концентраціях понад 2 % знаходиться в розплавах у вигляді пакетів графіту [5]. У роботі [4] щодо в'язкості розплаву чавуну при вмісті вуглецю у межах 1,32–7,8 % встановлено максимальне значення в'язкості (ν) при близькій до 2,14 % концентрації вуглецю та мінімальне значення в'язкості при 4,3% С. Отримані експериментальні закономірності зміни в'язкості розплаву автори пояснюють зміною зв'язків між атомами Fe–Fe, Fe–C та C–C. При вмісті вуглецю $\approx 2,14$ % передбачається утворення кластерів заліза з решітками (ГЦК). Автори вважають, що можливе утворення різних сиботаксичних групувань (C_mFe), в яких з підвищенням вмісту вуглецю зменшується щільність розплаву і, як наслідок, кінематична в'язкість. При цьому підвищується термодинамічна активність вуглецю та зв'язку C–C. Однак механізм і морфологія утворення зародків графіту залишаються нез'ясованими.

Як видно з рис. 1, в момент початку модифікації структура графіту однакова у всіх місцях розплаву. При контакті графітового зерна з γ -Fe виникає ефект «оточення» зерна частинками γ -Fe та ізоляції від основної маси розплаву. Графіт набуває близько 20 % кулястої форми та решту вермикулярної форми, що являє собою взаємопов'язані пелюстки. На відміну від пластинчастого графіту, вермикулярні включення мають меншу довжину, більшу товщину і округлі краї. У результаті ефекту «протікання» утворюються червоподібні ланцюжки відповідної довжини. Процес утворення вермикулярного графіту на початковому етапі подібний до процесу утворення структури з кулястою формою графіту, але через особливості будови гама-решітки заліза процес призводить до плоских (червоподібних) форм графітової структури.

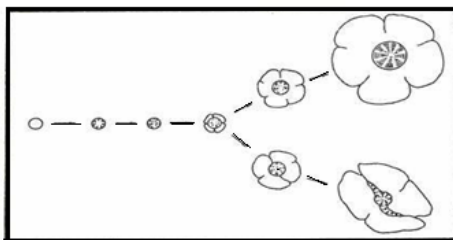


Рисунок 1 – Процес формування структури високоміцного чавуну

Джерело розроблене авторами на підставі [3,4]

Можливо виділити два варіанти зростання компактних включень графіту: у процесі кристалізації чавуну за рахунок збереження зв'язку з розплавом, або поєднання в одне, декілька компактних зародків і включень. Перший варіант в чавунах з вермикулярним графітом визначається як основний. За рахунок виділення і росту графітного включення, оточення аустеніту збіднене вуглецем і збагачене кремнієм. Оскільки аустеніт твердіє ще пізніше, він містить більший вміст вуглецю і менший

кремнію, ніж навколографітний. Вихідний стан чавуну має перліто-феритну структуру металевої матриці (до 70 % перліту), 80 % графіту вермикулярної форми (клас Гф6) і до 20 % – кулястої форми класу Гф12,13. Слід зазначити, що включення графіту поодинокі або розташовані невеликими групами та середнього розміру (Граз 45-90). Ферит розташований навколо включень графіту у вигляді оторочок, що переходять у феритні ділянки навколо групи включень. Перлітні ділянки збагачені вуглецем та марганцем, особливо по межах евтектичних зерен. Розподілення кремнію має змішану ліквіацію зі збагаченням центральних частин евтектичного зерна навколо графітних включень (ферит) і евтектичних границь (перліт). Процес формування структури високоміцного чавуну натеper є актуальним питанням вивчення.

Постановка завдання. Мета роботи – встановлення закономірностей структуроутворення високоміцного чавуну при використанні термодинамічної теорії фазових перетворень та аналіз діаграм стану компонентів Fe-Si-Mg лігатур.

Виклад основного матеріалу. Формуванню кулястої форми графіту при кристалізації розплаву чавуну, поряд з магнієм, сприяють і інші хімічні елементи, такі як РЗМ, літій, кальцій та ін. Однак магнієві лігатури визнані найбільш ефективними і економічними сфероїзаторами графіту при виробництві високоміцного чавуну. Спроби створення безмагнієвих процесів одержання чавуну з кулястою формою графіту не дали успіху. Залишковий масовий вміст магнію зазвичай становить 0,03...0,07 % і залежить від кількості елементів-демоцифікаторів у вихідному розплаві, забезпечує сфероїдизацію графіту і отримання заданої структури, фізико-механічних і службових властивостей високоміцного чавуну [7, 8, 9].

Введення у розплав модифікаторів Mg та рідкоземельних елементів (La, Ce, РЗМ), призводить до зміни поверхневої енергії на гранях ϵ -фаз. При цьому гомеопатичні сегрегації модифікаторів блокують зростання окремих граней ϵ -фаз, утворюючи різну форму гетерогенної графітизації зі зниженою вільною енергією: вермикулярну або глобулярну. Підвищена адсорбція модифікаторів Mg, (La, Ce, РЗМ) зі зниженою енергією зупиняє їх зростання у формі лусочок та сприяє їх коагуляції за рахунок зменшення вільної енергії.

Основою для розробки складу високоміцного чавуну є аналіз діаграм стану компонентів Fe-Si-Mg лігатур.

Система «залізо-кремній» [10-14]. З діаграми стану системи «Fe-Si» (рис. 2) видно два тверді розчини кремнію на основі γ -Fe і α -Fe. При температурі 1150 °C можна спостерігати граничну розчинність кремнію в (γ -Fe) – 3,84 ат. %, при температурі 1350 °C – 0,88 ат. %. Зазначимо, що в залежності від температури і складу сплаву, твердий розчин на основі α -Fe може існувати в трьох алотропних модифікаціях: невпорядкованій – α -Fe і впорядкованих – α_1 та α_2 . Фаза α_1 зазнає поліморфного перетворення в інтервалі температур 965...1150 °C і концентрацій кремнію 21...27 ат. %. Фаза α_2 утворюється при температурі 1302 °C за перитектичною реакцією $P + (\alpha\text{-Fe}) \leftrightarrow \alpha_2$. За аналогічними реакціями утворюються і модифікації фази α_1 : при 1250 °C, високотемпературна – $P + \alpha_2 \leftrightarrow \alpha_1(\text{BT})$ та при 1156 °C низькотемпературна – $\alpha_2 + \alpha_1(\text{BT}) \leftrightarrow \alpha_1(\text{HT})$.

Слід зазначити, що в певних температурно-концентраційних областях одночасно із твердими розчинами в системі Fe-Si існують інтерметалеві фази силіциди: Fe_2Si (чи β -фаза), Fe_5Si_3 (η -фаза), FeSi (ϵ -фаза), FeSi_2 (ξ -фаза). В свою чергу, ξ -фаза має дві модифікації – $\text{FeSi}_2(\text{HT})$ та $\text{FeSi}_2(\text{BT})$.

Показано, що при температурах 1212, 1410 і 1220 °C силіцидні фази Fe_2Si , FeSi та FeSi_2 відповідно, плавляться конгруентно та мають інтервал гомогенності, за винятком модифікації $\text{FeSi}_2(\text{HT})$, яка має чіткий вміст кремнію – 55 мас. % (66,6 ат. %). За участю фаз Fe_2Si кристалізується дві евтектики: $\alpha_1 + \text{Fe}_2\text{Si}$ при масовій частці

кремнію ~19,2 % і температурі 1200 °С, та $\text{Fe}_2\text{Si} + \text{FeSi}$ при ~22,0 мас. % кремнію і температурі 1203°С. Зазначимо, що складова Fe_2Si евтектоїдно розпадається при температурі 1040°С.

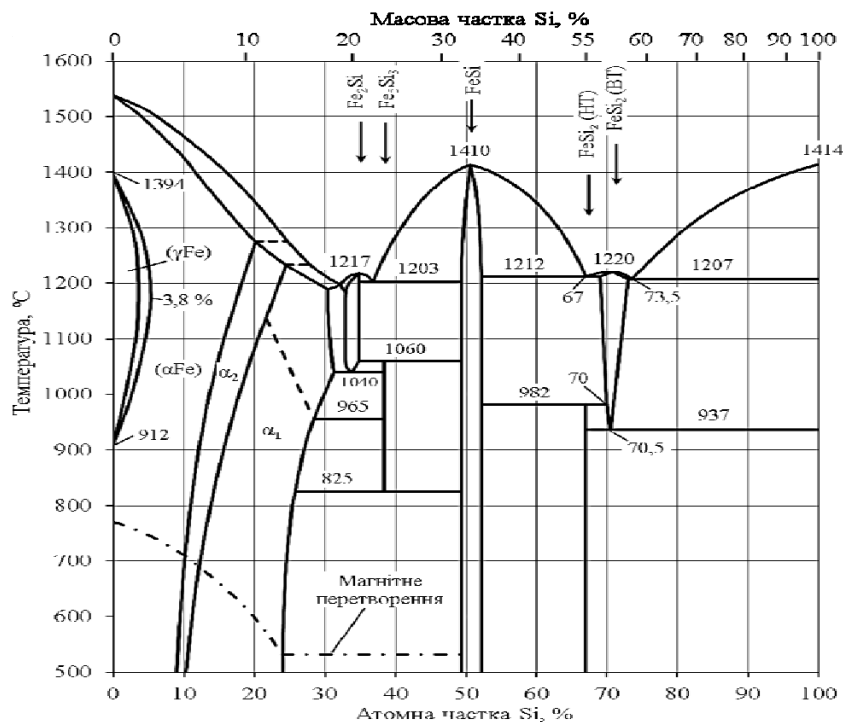


Рисунок 2 – Діаграма стану системи «Fe-Si»

Джерело на підставі [10,11,14]

Сполука Fe_5Si_3 існує в інтервалі температур інтервалі 1040...1212 °С, при цьому плавиться конгруентно при 1212 °С, а при 1060 °С утворюється за перитектичною реакцією. При температурі 825 °С ця фаза евтектоїдно розпадається.

При вмісті Si в межах 49...50,8 ат. % існує сполука FeSi . При температурі 982 °С і вмісті кремнію – 66,7 ат. % за перитектоїдною реакцією утворюється сполука FeSi_2 (HT). Високотемпературна модифікація FeSi_2 (BT) має область гомогенності, яка звужується при зниженні температури, а при температурі 937 °С – евтектоїдно розпадається на чистий кремній і FeSi_2 (HT). Зазначимо, що фаза FeSi_2 (BT) приймає участь в двох евтектичних рівновагах: FeSi_2 (BT) + Fe_2Si – при масовій частці кремнію ~ 51,0 % і температурі 1212 °С, та FeSi_2 (BT) + Si – при 58,2 мас. % кремнію і температурі 1207 °С.

Виявлено, що при швидкісному охолодженні сплавів з температури 1100 °С і вище, фаза Si розчиняє до 4 ат. % Fe, а при охолодженні від більш низьких температур, розчинність не спостерігається.

Враховуючи, що в сфероїдизуючих лігатурах (ФСМг) співвідношення залізо-кремній складає ~ 50/40, можна припустити присутність інтерметалевих сполук FeSi_2 і FeSi в лігатурах, з температурами плавлення 1220 °С і 1410 °С, відповідно.

Кремній знижує температури аустенітного та цементитного ліквідуса, а також аустенітного солідуса, підвищує температуру графітного ліквідуса, зміщує у бік менших концентрацій вуглецю лінії рівноваги $\gamma/\gamma+g$ та $\gamma/\gamma+c$; максимум на цементитному ліквідусі зміщується у бік менших концентрацій вуглецю. Отже, Si підвищує активність вуглецю, а C у рідині та аустеніті знижує розчинність цементиту в рідині та підвищує – в аустеніті.

Система «магній-кремній». Представлена на рисунку 3 рівноважна фазова діаграма Mg-Si-системи складається з рідини, твердого розчину Mg(Mg) з максимальною розчинністю кремнію 0,003 ат. %, інтерметалевої сполуки Mg_2Si та з незначною розчинністю магнію – твердого розчину Si(Si) [10, 13, 14].

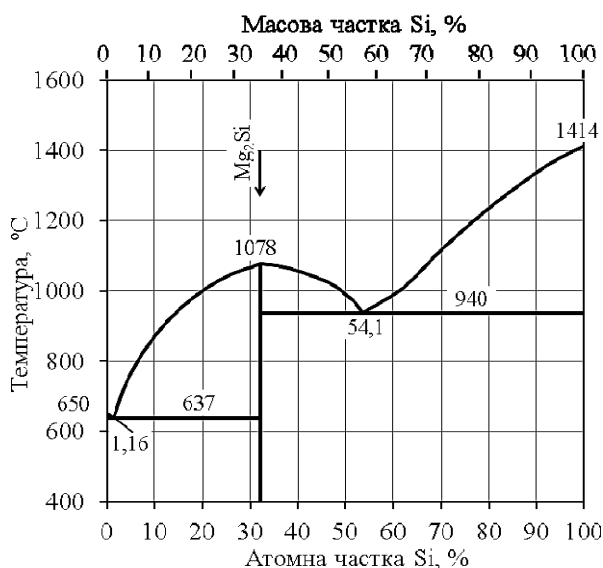


Рисунок 3 – Діаграма стану системи «Mg-Si»

Джерело на підставі [10,11,14]

Показано, що при зниженні температури до 1078 °С, починає виділятися з рідини термодинамічно стійка сполука Mg_2Si , що містить ~36,61 мас.% Si. Дана сполука бере участь в кристалізації двох евтектик: з вмістом кремнію ~ 54,10 ат. % і температури ~ 940 °С формується евтектика складу (Si) + Mg_2Si , і температури 637 °С та ~1,16 ат. % – Si – (Mg)+ Mg_2Si .

Показана можливість існування сполуки $MgSi$, яка утворюється при температурі 805 °С і концентрації кремнію ~ 50 ат. %, та Mg_4Si в результаті термічної дисоціації Mg_2Si за перитектоїдною реакцією $Mg_2Si + Si \leftrightarrow MgSi$. Слід зазначити, що перитектоїдна реакція утворює метастабільну евтектику з (Mg) при температурі ~575 °С і ~ 2,34 ат. % кремнію. При температурі 800 °С, двокомпонентні фази $FeSi$ та $FeSi_2$ розчиняють до 0,03 і 0,05 мас. % Mg, відповідно, а розчинність Fe в Mg_2Si досягає 0,3 мас. %. Подвійна фаза Fe_5Si_3 при температурах 800 та 1000 °С розчиняє до 0,5 і 1,1 мас. % Mg, відповідно [13, 14].

Система «залізо-магній-кремній». Отримання сплаву системи Fe-Si-Mg розчиненням чушкового магнію в рідкому феросиліції є найбільш простим методом. Кремній утворює міцні сполуки з металами-модифікаторами, зменшуючи інтенсивність реакційної взаємодії з розплавленим чавуном, що обумовлює покращення засвоєння магнію та підвищення ефективності модифікування. Однією з важливих характеристик, що визначає технологія отримання і хімічний склад магнієвмісного сплаву є температура плавлення феросиліцій-магнієвої лігатури, зниження якої є важливою умовою для успішного проведення сфероїдируючого модифікування.

Зазначимо, що оптимізація процесу розчинення і максимальне засвоєння магнію можливе при умові відносно низької температури плавлення компонентів, що входять до складу лігатур і високих температур їх випаровування. При визначенні складу лігатур рекомендовано використовувати діаграму стану системи Fe-Si-Mg (рис. 4) [13,14]. Показано, що при отриманні високоміцного чавуну поширені Fe-Si-Mg

аустеніту на феритокарбідну суміш, але прискорює виділення фериту. Кремній збільшує розчинність вуглецю в аустеніті, підвищуючи його стійкість. В матриці він концентрується навколо включень графіту, його концентрація в 2-3 рази вище, ніж в решті металевої основи [19].

Марганець в чавуні, легованому міддю, практично рівномірно розподілений в металевій матриці, а кремній має значно менший коефіцієнт ліквідації

Із збільшенням вмісту марганцю в металевій основі зростає кількість залишкового аустеніту. Марганець підвищує прокалюваність, проте, будучи карбідоутворюючим елементом та маючи більшу схильність до ліквідації на границях зерен, може негативно вплинути на структуру металевої матриці. При вмісті марганцю більше 0,5 % на границях евтектичних зерен утворюються крихіткі фази, які негативно впливають на показники міцності і пластичності чавуну.

Таким чином, розглянуті механізми формоутворення графітної фази у високоміцному чавуні потребують подальших досліджень.

Висновки:

1. Встановлено закономірності структуроутворення модифікованого чавуну при різних умовах кристалізації. Виконано аналіз дослідження закономірностей процесу утворення кулястого і вермикулярного графіту та аналіз діаграм стану компонентів «Fe-Si-Mg» лігатур.

2. Аналіз даних діаграм стану «Fe-Si», «Mg-Si», «Fe-Si-Mg» показав, що в складі сфероїдизуючих лігатур більшість сполук компонентів мають нижчу температуру плавлення ($t_{пл} < 1300$ °C) відносно до температури розплаву чавуну, за винятком деяких силіцидів заліза і кремній, температура плавлення яких вище 1400 °C, що може негативно вплинути на ефективність модифікування.

3. З'ясовано, що при перегріві заевтектичного чавуну в розплаві відбувається перерозподіл домішок. При цьому утворюються компактні впорядковані зони з псевдокарбідною метастабільною стехіометрією, які є основою для утворення кулястого графіту в процесі переохолодження розплаву без застосування модифікаторів.

Список літератури

1. Королев С.П., Панфилов Э.В. Чугун с вермикулярным графитом – конструкционный материал современного машиностроения. *Литейное производство. Литье и металлургия*. 2006. №2. С. 91-93.
2. Захарченко Э.В., Левченко Ю.Н., Горенко В.Г., Вареник П.А. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. Киев: *Наукова думка*. 1986. 248с.
3. Баранов Д.А. О механизме формирования вермикулярного графита при затвердевании чугуна. *Литейное производство*. 2004. № 10. С. 2-3.
4. Белов В.Д. Теория литейных процессов. Учебник. М: *РИОТИП*. 2008. 580 с.
5. Вертман, А.А., Самарин А.М. Свойства расплавов железа. М: *Наука*. 1969. 280с.
6. Doherty R.D., Ferrante V., Chen Y.H. *Scripta Metall*. 1986.
7. Жуков А.А., Снежной Р.Л. О возможности образования железоуглеродистых комплексов аренового типа в железоуглеродистых сплавах. *Термодинамика и физическая кинетика структурообразования в стали и чугуне*. М: 1967. Вип. 3. С. 175-179.
8. Бачинский Ю.Д., Бубликов В.Б. Улучшение структурообразования тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна при модифицировании в предкристаллизационном периоде. *Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві*: матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції, 25-28 вересня 2017 р. Краматорськ: ДДМА. 2017. С. 15-16.
9. Костіна Л.Л. Чавун з вермикулярним графітом: деякі закономірності структуроутворення і підвищення міцності. *Вестник ХНАДУ*. 2011. Вип.54. С. 142-148.
10. Лякишева Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: В 3-х. Т.2. М: Машиностроение. 1997. 1024 с.
11. Лякишева Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: В 3 т: Т.3. кн. 1. М: *Машиностроение*. 2001. 872 с.

12. Du Y., Zhao J. R., Zhang C., Chen H.L., Zhang L.J. Thermodynamic modeling of the Fe-Mg-Si system. *Journal of Mining and Metallurgy*. 2007. № 43(B). pp. 39-56.
13. Lebrun N., Baetzner C., Stamou A., Robinson J. Iron – Magnesium – Silicon. Ternary Alloy Systems: Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data. 2009. Vol. 11. pp. 135-147.
14. Бачинський Ю.Д. Вплив процесу модифікування в передкристалізаційному періоді на структуроутворення і властивості тонкостінних виробів з високоміцного чавуну: автореферат дисертації канд. техн. наук: 05.16.04. ФТІМС НАН України. Київ. 2017. 40с.
15. Ващенко К. И., Софрони Л. Магнийевый чугун. М: Машгиз. 1960. 487 с.
16. Aulin V., Kropivny V., Kuzyk O., Lyashuk O., Bosyi M., Vovk Y., Kropivna V., Sokol V., Senyk A., Slobodyan L. The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Vermicular Graphite. *Tribology in Industry*. 2021. Vol. 43. No. 4. pp. 654-666.
17. Кропивний В.М., Босий М.В., Кузик О.В., Кропивна А.В. Термодинамічні процеси при кристалізації і формуванні ліквациї у виливках з високоміцного чавуну. *Центральноукраїнський науковий вісник: Технічні науки*. 2019. № 1(32). С. 79-86.
18. Kropivny V.M., Bosyi M.V., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. Specific Distribution of Thermal Effects of Graphite Forming Reactions in High-strength Cast Iron. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький. 2020. вип. 3(34). С. 48-53.
19. Аулін В.В., Кропивний В.М., Кузик О.В., Кропивна А.В., Босий М.В. Роль теплофізичних процесів формування структури високоміцних чавунів. *Вісник інженерної академії України*. 2017. №3. С.133-137.

Referencis

1. Korolev, S.P., & Panfilov, E.V. (2006). Chugun s vermikulyarnym grafitom – konstrukcionnyj material sovremennogo mashinostroeniya [Cast iron with vermicular graphite is a structural material of modern mechanical engineering]. *Litejnoe proizvodstvo. Lite i metallurgiya – Foundry. Casting and metallurgy*, 2, 91-93 [in Russian].
2. Zaharchenko, E.V., Levchenko, Yu.N., Gorenko, V.G., & Varenik, P.A. (1986). *Otlivki iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom* [Cast iron with spherical and vermicular graphite]. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
3. Baranov, D.A. (2004). O mehanizme formirovaniya vermikulyarnogo grafita pri zatverdevanii chugunka [About the mechanism of formation of vermicular graphite during solidification of cast iron]. *Litejnoe proizvodstvo – Foundry*, 10, 2-3 [in Russian].
4. Belov, V.D. (2008). *Teoriya litejnyh processov* [Theory of casting processes]. M.: RIOTIP [in Russian].
5. Vertman, A.A., & Samarin A.M. (1969). *Svoystva rasplavov zheleza* [Properties of iron melts]. M: Nauka [in Russian].
6. Doherty, R.D., Ferrahte, V. & Chen, Y.H. (1986). *Seripta Metall* [in English].
7. Zhukov, A.A., & Snezhnoj, R.L. (1967). O vozmozhnosti obrazovaniya zhelezouglerodistykh kompleksov arenovogo tipa v zhelezouglerodistykh splavah [On the possibility of formation of iron-carbon complexes of the arene type in iron-carbon alloys]. *Termodinamika i fiziche-skaya kinetika strukturoobrazovaniya v stali i chugune - Thermodynamics and Physical Kinetics of Structure Formation in Steel and Cast Iron*, Issue 3, 175-179 [in Russian].
8. Bachinskyi, Yu.D., & Bublikov, V.B. (2017). Uluchshenie strukturoobrazovaniya tonkostennykh otlivok iz vysokoprochnogo chuguna pri modifitsirovanii v predkristallizacionnom periode [Improvement of structural formation of thin-walled castings from high-strength cast iron during modification in the precrystallization period]. «Perspektivni tehnologii, materiali i obladnannya u livarnomu virobnictvi»: *VI mizhnarodnoyi naukovotekhnichnoyi konferenciyi (25-28 veresnya 2017 r. Kramatorsk) – VI International Scientific and Technical Conference* (pp. 15-16) . Kramatorsk: DDMA [in Ukrainian].
9. Kostina, L.L. (2011). Chavun z vermikulyarnim grafitom: deyaki zakonomirnosti strukturoutvorenniya i pidvishennya micnosti [Cast iron with vermicular graphite: some regularities of structuring and increasing strength]. *Vestnik HNADU – Bulletin of KHNADU. Issue 54*, 142-148 [in Ukrainian].
10. Lyakisheva, N.P. (1997). *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem. (Vol. 3., prt.2)*. M. : Mashinostroenie [in Russian].
11. Lyakisheva N.P. (2001). *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem* [Diagrams of the state of double metal systems]. (Vols 3; Vol.3. book 1). M. : Mashinostroenie [in Russian].
12. Du, Y., Zhao, J. R., Zhang, C., Chen, H.L., & Zhang, L.J. (2007). Thermodynamic modeling of the Fe-Mg-Si system. *Journal of Mining and Metallurgy*, № 43(B). pp. 39-56 [in English].
13. Lebrun, N., Baetzner, C., Stamou, A., & Robinson, J. (2009). Iron – Magnesium – Silicon. Ternary Alloy

- Systems: Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data, *Vol. 11*, pp. 135-147 [in English].
14. Bachynskiy, Yu.D. (2017). Vpliv procesu modifikuvannya v peredkristalizacijnomu periodi na strukturoutvorennia i vlastivosti tonkostinnih virobiv z visokomicnogo chavunu [The influence of the modification process in the pre-crystallization period on the structure formation and properties of thin-walled products made of high-strength cast iron]. *Extended abstract of candidate's thesis*. FTIMS NAN Ukraini. Kiyiv [in Ukrainian].
 15. Vashenko, K.I. & Sofroni, L. (1960). *Magnievyj chugun [Magnesium cast iron]*. M: Mashgiz [in Ukrainian].
 16. Aulin, V. et al. (2021). The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Vermicular Graphite. *Tribology in Industry, Vol. 43, No. 4*, pp. 654-666 [in English].
 17. Kropivnyi, V.M., Bosyi, M.V., Kuzyk, O.V., & Kropivna, A.V. (2019). Termodinamichni procesi pri kristalizaciyi i formuvanni likvaciyi u vilivkah z visokomicnogo chavunu [Thermodynamic processes during crystallization and liquation formation in high-strength cast iron castings]. *Centralnoukrayinskij naukovij visnik: Tehnichni nauki – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 1(32)*, 79-86 [in Ukrainian].
 18. Kropivnyi, V.M., Bosyi, M.V., Kuzyk, O.V., & Kropivna, A.V. (2020). Specific Distribution of Thermal Effects of Graphite Forming Reactions in High-strength Cast Iron. *Centralnoukrayinskij naukovij visnik. Tehnichni nauki. – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 3(34)*, 48-53 [in English].
 19. Aulin, V.V., Kropivnyi, V.M., Kuzyk, O.V., Kropivna, A.V., & Bosyi, M.V. (2017). Rol teplofi-zichnih procesiv formuvannya strukturi visokomicnih chavuniv [The role of thermophysical processes in the formation of the structure of high-strength cast irons]. *Visnik inzhenernoyi akademiyi Ukraini – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine, 3*, 133-137 [in Ukrainian].

Volodymyr Kropivnyi, Prof., PhD in tech. sci., **Mykola Bosyi**, Sen. Lect., **Olexandr Kuzyk**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci., **Alena Kropivna**, Assoc. Prof., PhD in tech. sci., **Ludmyla Molokost**, Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

On the Question of Structural Formation of High-Compression Cast Iron Using State Diagrams System "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg"

The purpose of the work is to establish the patterns of structural formation of high-strength cast iron using the thermodynamic theory of phase transformations and to analyze state diagrams of the components of Fe-Si-Mg ligatures.

The article presents the results of the analysis of patterns of structural formation of high-strength cast iron when using state diagrams of the "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg" systems. The concept of graphite formation in high-strength cast iron is considered. The structure formation scheme of high-strength cast iron is presented. Disclosure of the mechanism of processes of formation of spherical and vermicular graphite opens wide opportunities for controlling the structure and properties of high-strength cast iron and contributes to the development of effective technological processes for obtaining cast products for various purposes.

It has been established that during the modification of cast iron melt, as a result of a significant redistribution of all elements dissolved in it, purification of impurities (sulfur, phosphorus, etc.) takes place, which allows obtaining the structure of cast iron with nodular graphite with the use of modifiers. Diagrams of the "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg" systems for the development of the composition of high-strength cast iron are given. After analyzing the data of the given state diagrams, it was concluded that in the composition of spheroidizing ligatures, all compounds of elements are low-melting ($t_{pl} < 1300$ °C) in relation to the melting temperature of cast iron. During the crystallization of cast iron with the release of austenite, a direct microliquation of silicon with a distribution coefficient less than unity is characteristic, manganese is more evenly distributed in the metal, and carbide stabilizing elements are treated in the liquid phase. The regularities of structure formation of modified cast iron under different crystallization conditions have been established. The analysis of the study of the regularities of the process of the formation of spherical and vermicular graphite and the analysis of state diagrams of the "Fe-Si-Mg" liga-tur components were performed.

high-strength cast iron, structuring of cast iron, spheroidal graphite, vermicular graphite, fluctuation

Одержано (Received) 28.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 08.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-98;62-822

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.43-50](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.43-50)

О.І. Скібінський, доц., канд. техн. наук, **А.О. Гнатюк**, канд. техн. наук, **М.О. Годунко**, доц., канд. техн. наук, **Д.В. Богатирьов**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Селєхова**

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: soigerotor@ukr.com*

Синтез профілю зубчатих коліс малошумного шестеренного насоса з низькою пульсацією

Розроблено математичний апарат для побудови робочих профілів шестерень малошумних насосів синусоїдального зачеплення з довільними геометричними параметрами і кількістю зубців, що дає можливість широкого впровадження перспективного виду зачеплення в конструкції гідравлічних машин. Встановлено, що застосування прямозубих шестерень із синусоїдальним зачепленням не забезпечує нерозривності контакту і приводить до зниження експлуатаційних показників шестеренних насосів, а використання косозубих шестерень забезпечує постійність контакту плоского зачеплення в будь-якому поперечному перерізі. Встановлено мінімальне значення кута нахилу зубців для забезпечення нерозривності контакту в зачепленні, надійного перекриття та відсутності зазорів.

малошумний шестеренний насос, синусоїдальне зачеплення, колова синусоїда, нерозривність контакту зачеплення

Постановка проблеми. Насоси шестеренні (НШ) знайшли широке розповсюдження в техніці завдяки простоті конструкції, компактним розмірам і невисокій собівартості. Водночас, конкурентна боротьба на ринку гідравлічних машин висуває нові високі вимоги щодо цих виробів. Недоліки НШ, такі як: високі шумові характеристики, пульсація тиску і об'ємної подачі на виході, змусили виробників гідравліки запропонувати нові концепції щодо усунення зазначених недоліків. Одним із таких рішень є застосування криволінійного профілю зубця, відмінного від евольвентного, який утворює нерозривний контакт. Особливістю також є застосування косозубих шестерень для забезпечення перекриття. Таке рішення усуває описані вище недоліки НШ суттєво розширюючи область їх застосування. Разом з тим такий профіль повинен мати високу точність виготовлення. У відкритому доступі практично відсутня інформація щодо геометрії такого профілю, а також технології виготовлення шестерень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день в фірмових каталогах продукції є обмежена інформація рекламного характеру щодо малошумних НШ з косим неевольвентним зачепленням, які випускаються компаніями Bosch Rexroth (Німеччина) [1] і Elica Marzocchi (Італія) [2]. Обидва вироби мають схожу конструкцію, напірні і шумові характеристики. Ключовою характеристикою, яка дозволяє знизити шум і нерівномірність об'ємної подачі є запатентована форма зубця в торцевому перерізі (рис. 1). При цьому точка контакту спряжених профілів має замкнену траєкторію у вигляді знаку нескінченності (∞).

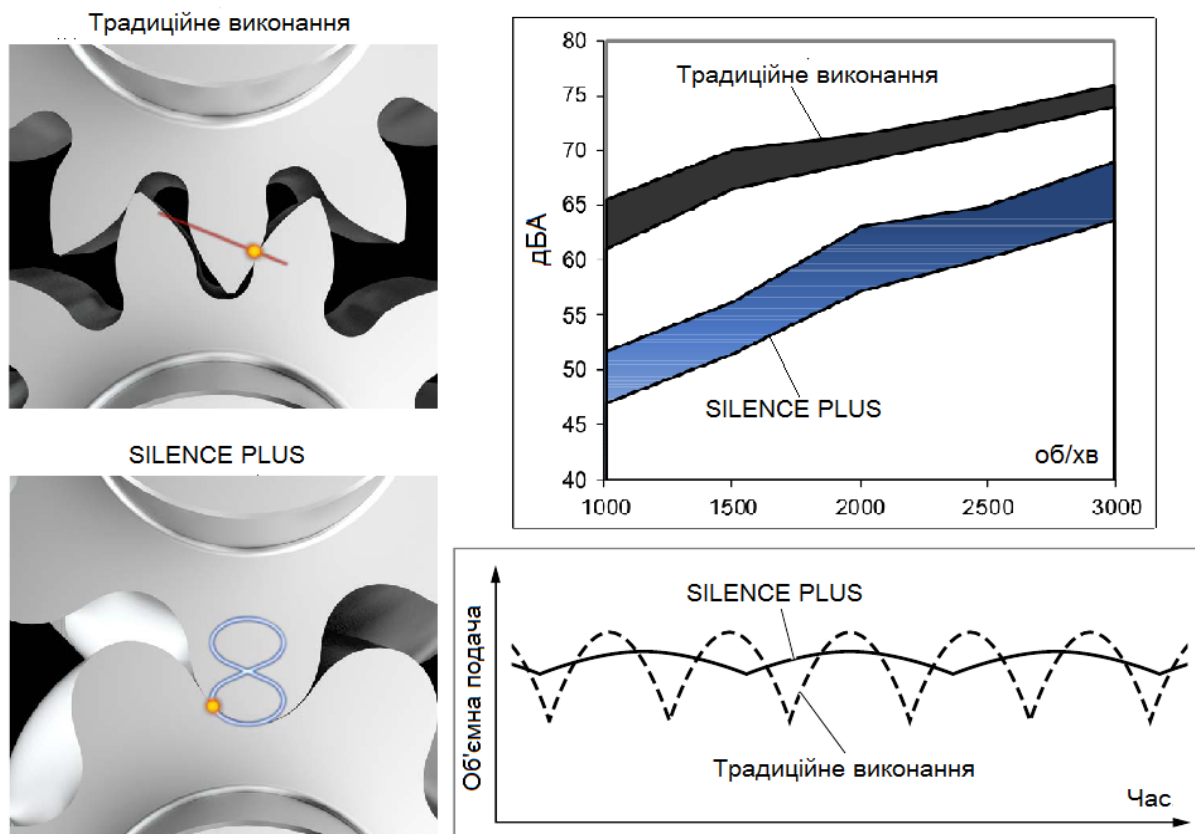


Рисунок 1 – Порівняльні характеристики шестерених насосів на основі традиційного евольвентного зачеплення та зачеплення SILENCE PLUS (Bosch Rexroth)

Джерело: на підставі [1]

Вершина зубця щільно прилягає до профілю западини, що виключає наявність защемленого об'єму рідини в міжзубовій западині. Згідно інформації з каталогу Bosch Rexroth, в малошумних насосах лінійки SILENCE PLUS рівень власного шуму знижено в середньому на 15 дБА у порівнянні з насосами з евольвентним зубцем. Крім того знижено на 75% нерівномірність об'ємної подачі (пульсації).

Очевидно, що базою для конструювання зачеплення подібного до SILENCE PLUS є профіль в торцевому перерізі. В літературі дуже обмежена інформація щодо геометрії такого зачеплення. Один із авторів Mario A. Morselli в патентній літературі і статтях представляє профіль подібного зачеплення без детальних пояснень [3, 4]. Аналіз показує, що скоріш за все, саме цей профіль використовує Erika Marzocchi в своїх насосах. Geqiang Li в своїй статті [5] досліджує напірні характеристики шестеренного насоса без пульсацій і пропонує комбінований профіль, який складається із дуг постійного радіуса і спряженої ділянки синусоїди. При цьому автори відмічають високу складність виготовлення такого зачеплення. Таким чином, відмічаємо недостатність інформації та фактів щодо геометрії і розрахунків подібних зачеплень, що може бути пов'язано із комерційною таємницею та елементами наукоємного проектування.

Постановка завдання. Метою дослідження є отримання універсальних формул для розрахунку складного синусоїдального профілю зубчастих колі малошумних насосів. Це дасть можливість проектувати синусоїдальні зачеплення з різними вхідними параметрами (кількість зубців, міжцентрова відстань тощо). Крім цього для косозубого синусоїдального зачеплення необхідно отримати формулу для визначення

мінімального кута нахилу зубця при якому буде забезпечено нерозривність контакту в зачепленні.

Виклад основного матеріалу. Для розв'язку задачі побудови профілю зубців зачеплення малощумних насосів подібних до SILENCE PLUS, авторами пропонується власний підхід, який полягає у застосуванні спеціальних тригонометричних функцій. Побудова профілю здійснюється в декілька етапів. На першому етапі виконується побудова базової кривої синусоїдальної форми (в подальшому – колової синусоїди).

Рівняння цієї кривої мають наступний вигляд:

$$x_1(\varphi) = \frac{m}{2} \cdot (z_1 + \lambda \cdot f(\varphi)) \cdot \cos(\varphi / z_1), \quad (1)$$

$$y_1(\varphi) = \frac{m}{2} \cdot (z_1 + \lambda \cdot f(\varphi)) \cdot \sin(\varphi / z_1), \quad (2)$$

де m – модуль колеса;

z_1 – кількість зубців колеса;

λ – коефіцієнт висоти зубця;

φ – кутовий параметр побудови;

$f(\varphi)$ – функція яка може приймати значення $\sin(\varphi)$, $\cos(\varphi)$, $\arctg(\cos(\varphi))$.

В залежності від підстановки $f(\varphi)$ форма зубця відрізнятиметься, причому зубці будуть мати ідентичну геометрію при $f(\varphi)=\sin(\varphi)$ і $f(\varphi)=\cos(\varphi)$. Слід зазначити, що отриманий профіль не є взаємногинаємим, тобто при позиціонуванні коліс на міжцентрову відстань і утворення зачеплення, маємо інтерференцію кривих. Звідси впливає необхідність формування уніфікованого профілю, коли обидва колеса мають ідентичний профіль і можуть оброблятися однаковим інструментом.

Другий етап – генерація профілю спряженого колеса. Він формується як обвідна сімейства колових синусоїд, при обкаті ділильного кола синусоїди навколо ділильного кола формованого колеса. Ділянки такого профілю в подальшому будуть задіяні в формуванні остаточного профілю колеса. Ділильні діаметри коліс і міжцентрова відстань за умови рівності зубців будуть рівними і визначатимуться за формулами:

$$\left[d_1 = m \cdot z_1, \quad d_2 = m \cdot z_2, \quad a_w = \frac{m}{2} (z_1 + z_2) \right], \quad (3)$$

де z_2 – кількість зубців спряженого колеса (для НШ $z_2=z_1$);

Побудова профілю спряженого колеса починається з опису сімейства положень одного з профілів, відносно якого будується обвідна. Сімейства параметричних кривих описуються наступними рівняннями:

$$x_2(\varphi, t) = a_w \cdot \cos(t) - x_1(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t\right) + y_1(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t\right), \quad (4)$$

$$y_2(\varphi, t) = a_w \cdot \sin(t) - y_1(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t\right) - x_1(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t\right), \quad (5)$$

де t – параметр, що визначає положення кривої $x_1(\varphi)$ $y_1(\varphi)$ у множині сімейства.

Зв'язок параметрів t і φ визначається із умови [6]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} \cdot \frac{\partial Y}{\partial \varphi} - \frac{\partial X}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial Y}{\partial t} = 0. \quad (6)$$

Перепишемо умову (6), підставляючи частинні похідні і виконуючи спрощення:

$$a_w x_1'(\varphi) \cos\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) - a_w y_1'(\varphi) \sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) - \left(\frac{z_2}{z_1} + 1\right) \cdot (x_1(\varphi) x_1'(\varphi) + y_1(\varphi) y_1'(\varphi)) = 0. \quad (7)$$

Розв'язок подібних рівнянь розглянуто в роботах по епіциклоїдальному зачепленню героторної пари [7]. Розділимо складові отриманого рівняння на $\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}$:

$$\frac{a_w x_1'(\varphi) \cos\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right)}{\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}} - \frac{a_w y_1'(\varphi) \sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right)}{\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}} = \left(\frac{z_2}{z_1} + 1\right) \frac{x_1(\varphi) x_1'(\varphi) + y_1(\varphi) y_1'(\varphi)}{\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}} \quad (8)$$

Вводимо додаткову функцію $\beta(\varphi)$, яка задовольняє умовам:

$$\left[\sin \beta(\varphi) = \frac{x_1'(\varphi)}{\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}}, \quad \cos \beta(\varphi) = \frac{y_1'(\varphi)}{\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}}, \quad \operatorname{tg} \beta(\varphi) = \frac{x_1'(\varphi)}{y_1'(\varphi)} \right]. \quad (9)$$

Перепишемо рівність (8), підставляючи $\beta(\varphi)$:

$$a_w \sin \beta(\varphi) \cos\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) - a_w \cos \beta(\varphi) \sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) = \left(\frac{z_2}{z_1} + 1\right) \frac{x_1(\varphi) x_1'(\varphi) + y_1(\varphi) y_1'(\varphi)}{\sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}}. \quad (10)$$

Розв'язуючи рівняння (10), отримуємо функцію зв'язку параметрів у вигляді $t = t(\varphi)$:

$$t(\varphi) = \frac{z_1}{z_2} \left[\beta(\varphi) - \arcsin \left(\frac{[x_1(\varphi) x_1'(\varphi) + y_1(\varphi) y_1'(\varphi)] \cdot \left(\frac{z_2}{z_1} + 1\right)}{a_w \sqrt{(x_1'(\varphi))^2 + (y_1'(\varphi))^2}} \right) \right]. \quad (11)$$

Для уточнення $\beta(\varphi)$ застосовуємо формулу перетворення для тангенсу:

$$\operatorname{tg} \left(\beta(\varphi) + \frac{\varphi}{z_1} \right) = \frac{\operatorname{tg} \left(\frac{x_1'(\varphi)}{y_1'(\varphi)} \right) + \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{z_1} \right)}{1 - \operatorname{tg} \left(\frac{x_1'(\varphi)}{y_1'(\varphi)} \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{z_1} \right)} = \frac{\lambda \cdot z_1 \cdot f'(\varphi)}{z_1 + \lambda \cdot f(\varphi)}. \quad (12)$$

Тоді шукану функцію $\beta(\varphi)$ можна представити у вигляді:

$$\beta(\varphi) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\lambda \cdot z_1 \cdot f'(\varphi)}{z_1 + \lambda \cdot f(\varphi)}\right) - \frac{\varphi}{z_1}. \quad (13)$$

Записуємо остаточні рівняння шуканої кривої:

$$x_2(\varphi) = a_w \cdot \cos(t(\varphi)) - x_1(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t(\varphi)\right) + y_1(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t(\varphi)\right), \quad (14)$$

$$y_2(\varphi) = a_w \cdot \sin(t(\varphi)) - y_1(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t(\varphi)\right) - x_1(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{z_1 + z_2}{z_1} \cdot t(\varphi)\right). \quad (15)$$

Маючи колову синусоїду і обвідну її положень, третім етапом є суміщення 2-х кривих до спільного центру координат (рис. 2). В результаті такого суміщення утворюються точки спряження профілів, які лежать на діляльному колі. Якщо розглядати в межах одного зубця, то маємо дві точки спряження T1 і T2, які умовно ділять профіль на виступ і западину. Уніфікація профілю шестерень досягається видаленням ділянок кривої $(x_1; y_1)$ в межах западини, і кривої $(x_2; y_2)$ в межах виступу, а залишені ділянки, які в кінцевих точках спряження мають спільну дотичну, формують кінцевий профіль колеса.

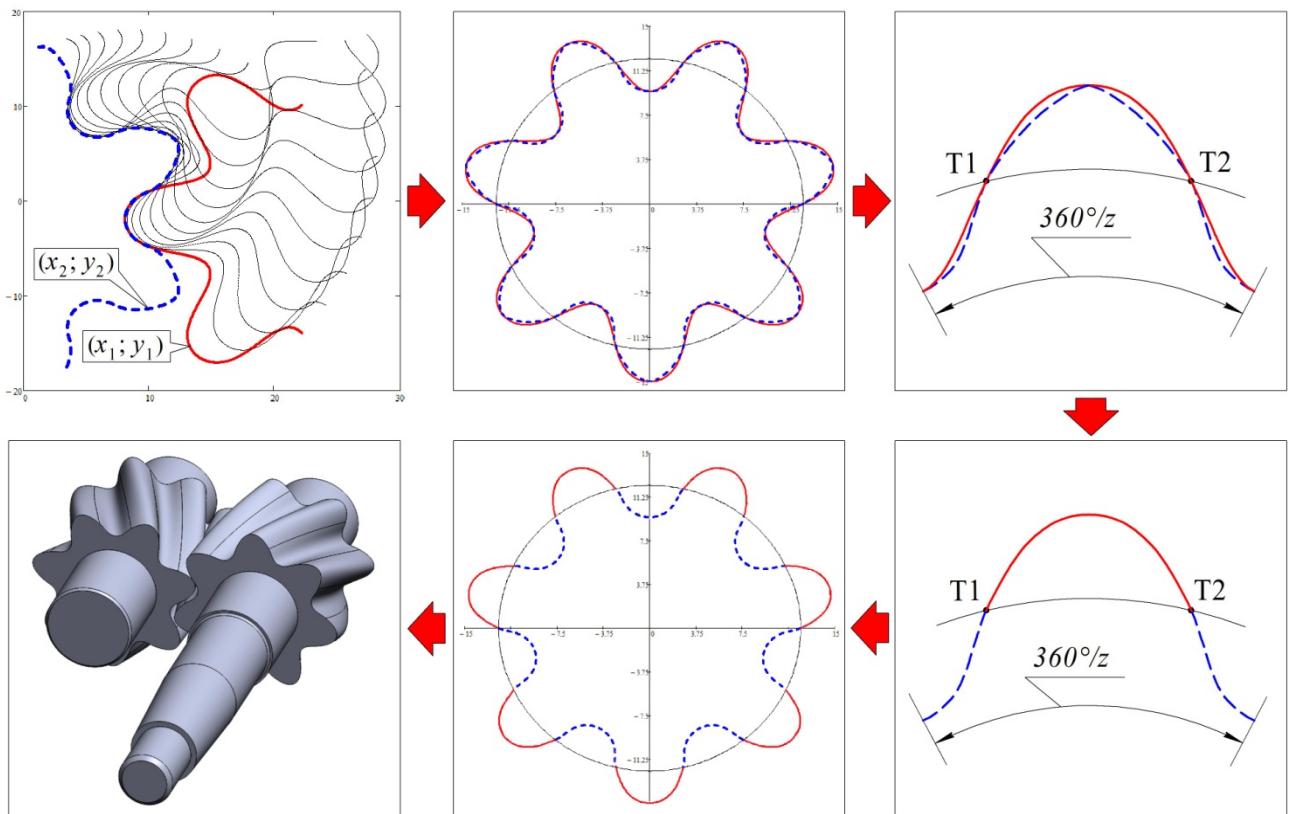


Рисунок 2 – Послідовність етапів побудови уніфікованого торцевого профілю шестерні для зачеплення малозшумного НШ

Джерело: розроблено автором

Окремо слід виділити косозубе виконання зубчатого вінця шестерень. Саме ця особливість забезпечує постійність контакту профільних поверхонь і перекриття. Якщо розглянути плоске зачеплення, стає очевидним що прями зуб не здатен забезпечити нерозривність контакту в силу того, що в будь-якій фазі матимемо лише 1 точку контакту. В зачепленні в будь-який момент часу, більше 1 зубця одного з коліс перебувати не може. В традиційних зубчатих передачах на момент виходу зубця із зачеплення, черговий зубець вже знаходиться в контакті, чим забезпечує перекриття. Прямозубе виконання може утворювати зазори (рис. 3), що неминуче призведе до втрат робочої рідини, зниження ККД і т.ін.

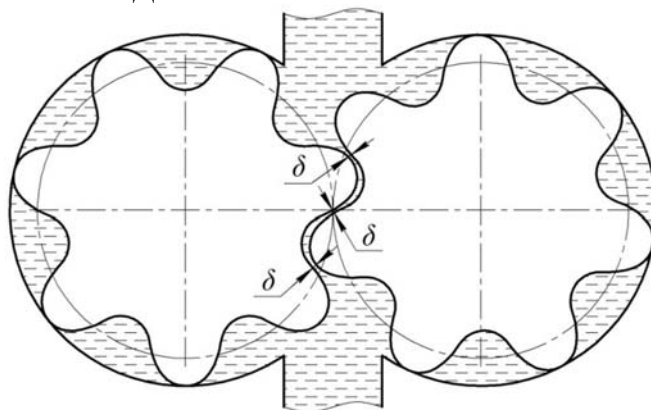


Рисунок 3 – Утворення зазору в плоскому зачепленні

Джерело: розроблено автором

Косозубий вінець забезпечує постійність контакту плоского зачеплення в будь-якому поперечному перерізі шестерень. Відповідно, забезпечення надійного перекриття буде залежати від значення кута нахилу зубця. На думку авторів, для забезпечення надійного перекриття, буде достатньо, якщо профілі на торцях шестерні при утворенні гвинтової зубчатої поверхні, утворять кут повороту один відносно одного не менше $180/z$ (рис. 4), незалежно від ширини вінця, що корелює з результатами обміру дослідних зразків Bosch Rexroth і Elika Marzocchi. Водночас занадто крутий кут нахилу зубця призведе до збільшення осьового навантаження на опорний підшипник.

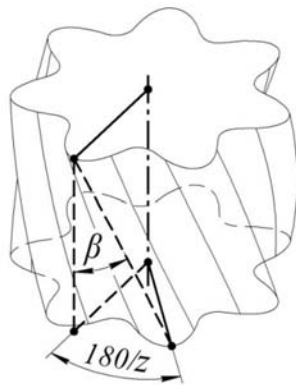


Рисунок – 4 Схема визначення мінімального кута нахилу зубця

Джерело: розроблено автором

Таким чином, мінімальний кут нахилу зубця косозубої шестерні для забезпечення нерозривності контакту зачеплення:

$$\beta_{\min} = \arctg\left(\frac{\pi}{2 \cdot z_1}\right). \quad (16)$$

В підсумку можна зазначити, що рішення для побудови складного профілю зубців малошумного НШ було знайдено. В подальшому залишаються відкритими питання щодо розробки технології виготовлення та методів контролю подібних зубчатих вінців. Це може бути предметом подальших досліджень, оскільки наведені НШ мають великий потенціал і суттєво розширюють їх області застосування.

Висновки. В результаті проведеного аналізу, досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Проаналізовано літературні та патентні джерела стосовно малошумних синусоїдальних шестеренних насосів з низьким рівнем пульсацій. Відмічено відсутність інформації у відкритому доступі стосовно геометрії зачеплення, яке покладено в основу наведених шестеренних насосів;

2. Розроблено та представлено власний математичний апарат, який дозволяє будувати профілі зубців шестерень для малошумних шестеренних насосів з довільними геометричними параметрами і кількістю зубців;

3. Встановлено, що застосування прямозубих шестерень з представленою геометрією не забезпечує нерозривності контакту і матиме негативний вплив на експлуатаційні показники шестеренного насоса. Встановлено мінімальне значення кута нахилу зубців для забезпечення нерозривності контакту в зачепленні і відсутності зазорів.

Список літератури

1. External gear pump. *SILENCE PLUS AZPJ*: веб-сайт. URL: <https://www.boschrexroth.com/en/ca/media-details/4791985e-efc7-46aa-9514-7667c522fd73> (дата звернення: 24.05.2023)
2. *ELIKA Products*: веб-сайт. URL: <https://www.marzocchipompe.com/en/node/750> (дата звернення: 24.05.2023)
3. Improved geared hydraulic apparatus: pat. WO 2008/111017 A1 World Intellectual Publication: IPC F01C 1/08, F04G 2/08. № PCT/IB2008/050973; stat. 14.03.2008; publ. 18.09.2008.
4. Gear wheel with profile capable of meshing with sem-encapsulation in a geared hydraulic apparatus: pat. US 9,404,366 B2 United States: CPC F04C 2/084, F04C 2/14. № 14/287,527; stat. 27.05.2014; publ. 02.08.2016.
5. Geqiang Li, Longfei Zhang, Weifeng Han Profile design and displacement analysis of the low pulsating gear pump. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10. Pp. 1–11. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814018767003> (дата звернення: 24.05.2023).
6. Радзевич С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории: монография. Киев: «Растан», 2001. 590 с.
7. Скібінський, О. І., Гуцул В.І., Гнатюк А.О. Визначення умов існування спряженої огинаючої сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд в циклоїдальній передачі внутрішнього зачеплення. *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: *Машинобудування*. 2014. № 70. С. 159-165.

Referencis

1. External gear pump. *SILENCE PLUS AZPJ*: веб-сайт. *boschrexroth.com*. Retrieved from <https://www.en/ca/media-details/4791985e-efc7-46aa-9514-7667c522fd73> [in English].
2. *ELIKA Products*: website. *marzocchipompe.com*. Retrieved from <https://www.marzocchipompe.com/en/node/750> [in English].
3. Improved geared hydraulic apparatus: pat. WO 2008/111017 A1 World Intellectual Publication: IPC F01C 1/08, F04G 2/08. № PCT/IB2008/050973; stat. 14.03.2008; publ. 18.09.2008 [in English].
4. Gear wheel with profile capable of meshing with sem-encapsulation in a geared hydraulic apparatus: pat. US 9,404,366 B2 United States: CPC F04C 2/084, F04C 2/14. № 14/287,527; stat. 27.05.2014; publ. 02.08.2016 [in English].

5. Geqiang Li, Longfei Zhang, Weifeng Han Profile design and displacement analysis of the low pulsating gear pump. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, Vol. 10 1–11. Retrieved from <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814018767003> [in English].
6. Radzevich, S. P. (2001) *Formoobrazovanie poverhnostej detalej. Osnovy teorii [Forming of surfaces of parts. Fundamentals of theory]*. Kyiv: Rastan [in Ukrainian].
7. Skibinskyi, O. I., Gutsul, V.I., & Gnatuk, A.O. (2014). Vyznachennia umov isnuvannia spriazhenoi ohynaiuchoi simejstva ekvidistant do vkorochenykh epitsykloid v tsykloidal'nij peredachi vnutrishn'oho zacheplennia [Conditions determination of existence of tangent curve to family of equidistant curves of the shortened epicycloids in epicyclic transmission internal gear]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii: Mashynobuduvannia, 70 - The Herald of NTUU "KPI". Series: Mechanical Engineering, 70*, 159-165 [in Ukrainian].

Oleksandr Skibinskyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Gnatuk**, PhD tech. sci., **Maksym Hodunko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Bohatyrov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyna Seliekhova**, Assist. *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Synthesis of the Profile of Low-Noise Gear Pump Gears with Low Pulsation

Low-noise gear pumps with non-involute gear profiles, which have undeniable advantages over pumps with involute gear profiles (low noise characteristics, low pressure and volumetric pulsation, inseparability of gear contact), have not gained wide popularity due to difficulties in designing and manufacturing the working profiles of the gears. Companies manufacturing low-noise pumps provide only promotional information, while information about the meshing geometry, profile, and manufacturing technology is practically absent.

The aim of the research is to obtain universal formulas for calculating the complex sinusoidal profile of gears for low-noise pumps. This will allow designing sinusoidal meshings with different input parameters (number of teeth, center distance, etc.). Additionally, for the helical sinusoidal meshing, it is necessary to derive a formula for determining the minimum tooth helix angle that ensures inseparability of contact in the meshing.

Several stages are involved in obtaining the universal formulas. In the first stage, the construction of a base sinusoidal curve is performed. The obtained profile is not mutually enveloping, meaning that when positioning the gears at the center distance and forming the meshing, there is interference of curves. Hence the need for forming a unified profile where both gears have identical profiles and can be processed by the same tool. In the second stage, the generation of the conjugate gear profile is performed as an enveloping family of circular sine waves, by rolling a dividing circle of the sine wave around the generating circle of the formed gear. Segments of this profile will be further involved in forming the final gear profile. In the third stage, the circular sine wave and its enveloping positions are overlaid to a common center of coordinates. As a result, the conjugate profile points lying on the dividing circle are formed. The unification of the gear profile is achieved by removing certain sections of the curve within the dedendum and addendum, while the remaining sections that have a common tangent at the end points of the conjugation form the final gear profile.

As a result of the conducted research, a mathematical apparatus has been developed that allows building gear tooth profiles for low-noise gear pumps with arbitrary geometric parameters and number of teeth. The minimum value of the tooth helix angle required to ensure contact inseparability and absence of clearances has been determined.

low-noise gear pump, sinusoidal meshing, circular sine wave, inseparability of meshing contact

Одержано (Received) 24.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 27.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

А. Р. Апаракін, канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: anton.aparakin@gmail.com

Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин

Метою роботи є створення такого принципу розробки проектів модельного ряду шестеренних гідравлічних машин, який оптимізує умови виробництва і маркетингу, із наступним зниженням металомісткості агрегату та собівартості виробництва. Розглянуто та виділено недоліки системи створення проектів гідравлічних машин шестеренного типу та їх реалізації. Розглянуто принципи, що передбачають максимальну диференціацію перемінних складових деталей та вузлів, та створення базових об'єктів з постійною складовою структурою. Проаналізовано конструктивну схему гідравлічної машини на базі теорії «надлишкових зв'язків». Розглянуто схеми з вилученням надлишкових зв'язків за рахунок введення бочкоподібного повздовжнього контуру зубця та введення центрального навантаження на ведучу шестерню. Визначено, що зменшення надлишкових зв'язків у запропонованій схемі, відносно традиційної схеми, посприє зменшенню додаткових деформацій і втрат енергії при роботі агрегату в режимі гідромотора і зменшенню втрат рідини при роботі в режимі насоса. Доведено, що виконання однієї із спряжених шестерень з бочкоподібним повздовжнім профілем зубців забезпечить стабілізацію моменту зрушення при роботі в режимі гідромотора.

шестеренний насос, проектування, уніфікація, надлишкові зв'язки

Постановка проблеми. Існуюча система створення проектів гідравлічних машин шестеренного типу та їх реалізація недостатньо досконала по ряду причин, зокрема:

- відсутність достатнього рівня уніфікації;
- не дотримані вимоги по організації виробництва та складського сектору, на які б не впливали миттєві коливання ринкових потреб;
- використання недосконалих конструктивних рішень, які не враховують вимоги:
 - навантажень деталей при термічній обробці;
 - можливостей точної механічної обробки.

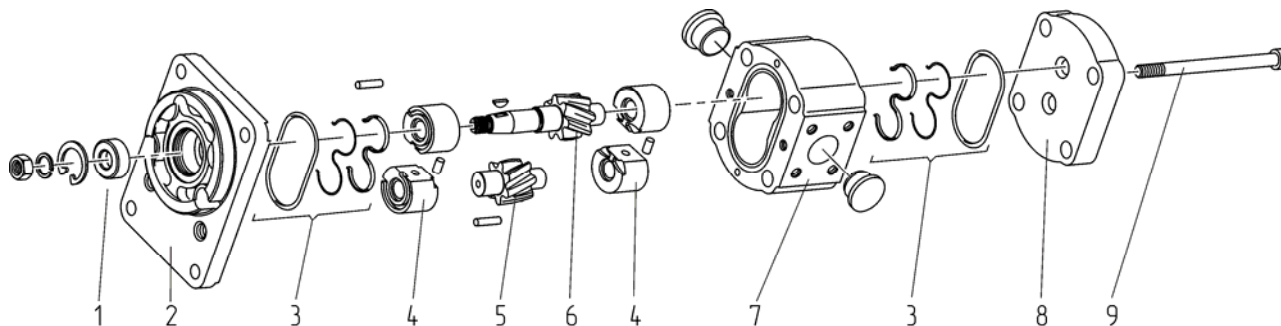
Ця система не може бути ефективною в умовах крупносерійного виробництва.

Обумовлена система побудована на стихійному відтворенні аналогів відомих світових виробників. Але при цьому не враховується те, що кожна фірма розробляє проект, який враховував би власні потреби, можливості виробництва, і не перетинався з конкурентами. Внаслідок чого однакові функційно гідравлічні машини мають суттєві відмінні ознаки.

Таке повторення проектів в рамках єдиного виробника, може привести до стійкої економічної кризи, внаслідок неможливості відтворення економічних показників при малих партіях і неможливості створення попередніх запасів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз модельного ряду відомих виробників шестеренних гідромашин показав відносну однорідність асортименту. Гідравлічні машини провідних виробників, таких як Bondioli & Pavesi [1], Parker [2], Vivoil [3], Marzocchi [4], Settima [5], Casappa [6] Bosch Rexroth [7], мають масштабування по робочому об'єму, а також, переважно, однакову конструкцію (рис. 1) - корпусні деталі агрегатів та підшипникові вузли майже незмінні, однак наявний широкий асортимент варіантів по приєднуваним розмірам:

- вихідного валу (шип під муфту, конус 1:5 або 1:8, шліци прямобічні або евольвентні різних стандартів і типорозмірів, шпонка призматична або сегментна);
- гідравлічної системи (магістралі всмоктування та напірної магістралі);
- монтажу у виробі (2 або 4 болти крізь корпус, прямокутний або круглий фланець, корпус приводу).



- 1 – ущільнення вихідного валу; 2 – кришка передня з фланцем;
 3 – комплект ущільнень кришки та підшипникового вузла; 4 – підшипниковий вузол;
 5 – ведена шестерня; 6 – ведуча шестерня; 7 – корпус; 8 – кришка задня; 9 – гвинти.

Рисунок 1 – Типова конструкція сучасних моделей шестеренних гідромашин

Джерело: на підставі [8]

Актуальність досліджень у даній тематиці підтверджується великою кількістю робіт, які проводяться стосовно підвищення подачі шестеренних насосів, вдосконалення та оптимізації зачеплення шестерень. Ці питання розглядаються у роботах як вітчизняних дослідників, таких як Кулешков Ю. В. [9], так і зарубіжних [10, 11]. Також, останніми тенденціями у дослідженнях гідравлічних машин є використання комп'ютерного моделювання для вивчення вузькоспеціальних аспектів робочих процесів насосу [12, 13].

Постановка завдання. Метою роботи є створення такого принципу розробки проектів модельного ряду шестеренних гідравлічних машин, який оптимізує умови виробництва і маркетингу, із наступним зниженням собівартості виробництва.

Виклад основного матеріалу. Як вихід із ситуації, що склалася, варто розглянути принципи кардинальної уніфікації гідравлічних машин. Такі принципи передбачають максимальну диференціацію перемінних складових деталей та вузлів, та створення базових об'єктів з постійною складовою структурою. Основу цього принципу складає механізм відокремлення складних і трудомістких елементів від відносно простих та менш трудомістких. Принцип передбачає можливість за рахунок гнучкої конструктивної схеми створити гнучке виробництво гідравлічних машин. Одночасно з цим необхідно забезпечити дотримання функційних показників на досягнутому рівні, або навіть забезпечити їх покращення. Це можливо здійснити лише глибиною проаналізувавши конструктивну схему гідравлічної машини на базі теорії «надлишкових зв'язків» та інших теорій.

Шестеренна гідравлічна машина в режимі насоса працює таким чином, що потік рідини, який всмоктується, поділяється шестернями на два незалежних потоки. Після об'єднання потоку в зоні напору, загальний потік отримує залежність від двох факторів:

- зовнішній опір гідравлічної системи;
- внутрішня герметичність.

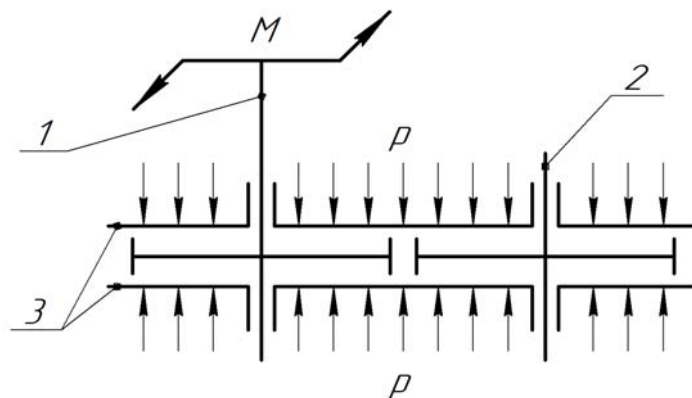
При цьому шестерні, які утворюють два потоки в традиційних конструктивних схемах насосів, мають не рівноцінне навантаження, внаслідок чого вони можуть знаходитись в різних просторових положеннях в процесі функціонування. Якщо ведуча шестерня отримує навантаження кручення та асиметричного вигину, то ведена шестерня отримує навантаження симетричного вигину. Виходячи з цього постулату, шестерні можуть мати різну ступінь торцевої та периферійної герметичності.

Гідравлічна машина в режимі гідромотора працює таким чином, що потік рідини перетворюється в подвійний енергетичний потік, який обертає обидві шестерні. Ефективність енергетичного потоку гідравлічної машини в режимі гідромотора залежить також від двох факторів: зовнішнього механічного опору та внутрішньої герметичності. Ці фактори є адекватними з факторами які супроводжують роботу гідравлічної машини в режимі насоса. Тобто, існує в обох випадках зовнішній опір, який утворює навантаження на шестерні, сам же характер навантаження для обох видів гідравлічних машин є однаковим.

Наступним кроком буде обґрунтування запропонованого постулату та спроба врівноважити навантаження на обох шестернях за рахунок вилучення «надлишкових зв'язків» з забезпеченням явища «самовстановлення» шестерень при роботі шестеренних гідромашин. Вилучення «надлишкових зв'язків» в схемі шестеренної гідромашини створює ефект силової адаптації ведучої шестерні відповідно до адаптації веденої, що впливає на покращення вихідних показників виробу.

Надлишкові зв'язки – це шкідливі, пасивні зв'язки в насосі, вилучення яких не приведе до зниження його функційних показників, так як надлишкові зв'язки сприяють додатковим деформаціям ланок і втратам енергії при роботі насоса.

На рис. 2 приведено узагальнену схему шестеренної гідравлічної машини, з позначенням крутного моменту та тиску.



1 – ведуча шестерня; 2 – ведена шестерня; 3 – торцеві ущільнювачі (підшипники ковзання);
 M – крутний момент; p – тиск, який діє на торцеві ущільнювачі.

Рисунок 2 – Узагальнена схема шестеренної гідравлічної машини

Джерело: розроблено автором

Вилучення надлишкових зв'язків і створення гідравлічних машин без них - складний процес, вирішення якого можливе за методикою проф. Л.М. Решетова [14]. Сутність його полягає у використанні тільки статистично визначених систем, що дозволяє вирівняти потоки енергії в паралельних елементах, якими є дві шестерні, що взаємодіють.

Рациональність схеми може бути визначена при підрахунках числа надлишкових зв'язків q по формулі Решетова:

$$q = w - 6n + 5P_V + 4P_{IV} + 3P_{III} + 2P_{II} + P_I, \quad (1)$$

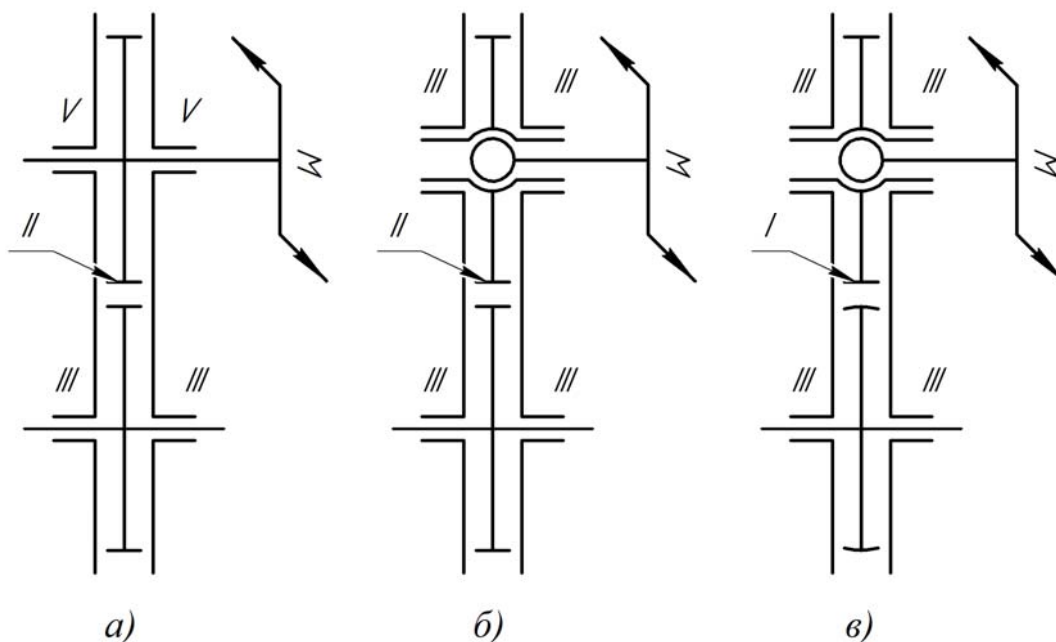
де w – число ступенів вільності;

n – число рухомих ланок;

$P_V, P_{IV}, P_{III}, P_{II}, P_I$ – число кінематичних пар, відповідно V, IV, III, II, I класів.

При підрахунках числа рухомих ланок враховуються тільки дві ланки, які утворюють з'єднання, всі проміжні ланки не враховуються.

На рис. 3 наведено ряд послідовних кроків по вилученню надлишкових зв'язків в схемах шестеренних гідравлічних машин. Традиційна схема побудови гідравлічної машини (рис. 3, а) спочатку зазнає вилучення надлишкового зв'язку за рахунок введення центрального навантаження ведучої шестерні (рис. 3, б), а потім введення бочкоподібного повздожнього контуру зубця веденої шестерні.



а) вихідна схема з боковим навантаженням ведучої шестерні; б) схема з введенням центрального навантаження на ведучу шестерню, з вилученням надлишкового зв'язку; в) схема з додатковим вилученням надлишкових зв'язків за рахунок введення бочкоподібного повздожнього контуру зубця.

Рисунок 3 – Схема поступового вилучення надлишкових зв'язків

Джерело: розроблено автором

Використавши формулу (1) до схеми рис. 3, а, отримаємо:

$$q = 1 - 6 \cdot 2 + 5 \cdot 2 + 3 \cdot 2 + 2 \cdot 1 = 7, \quad (2)$$

до схеми рис.3, б:

$$q = 1 - 6 \cdot 2 + 5 \cdot 3 + 2 \cdot 1 = 6, \quad (3)$$

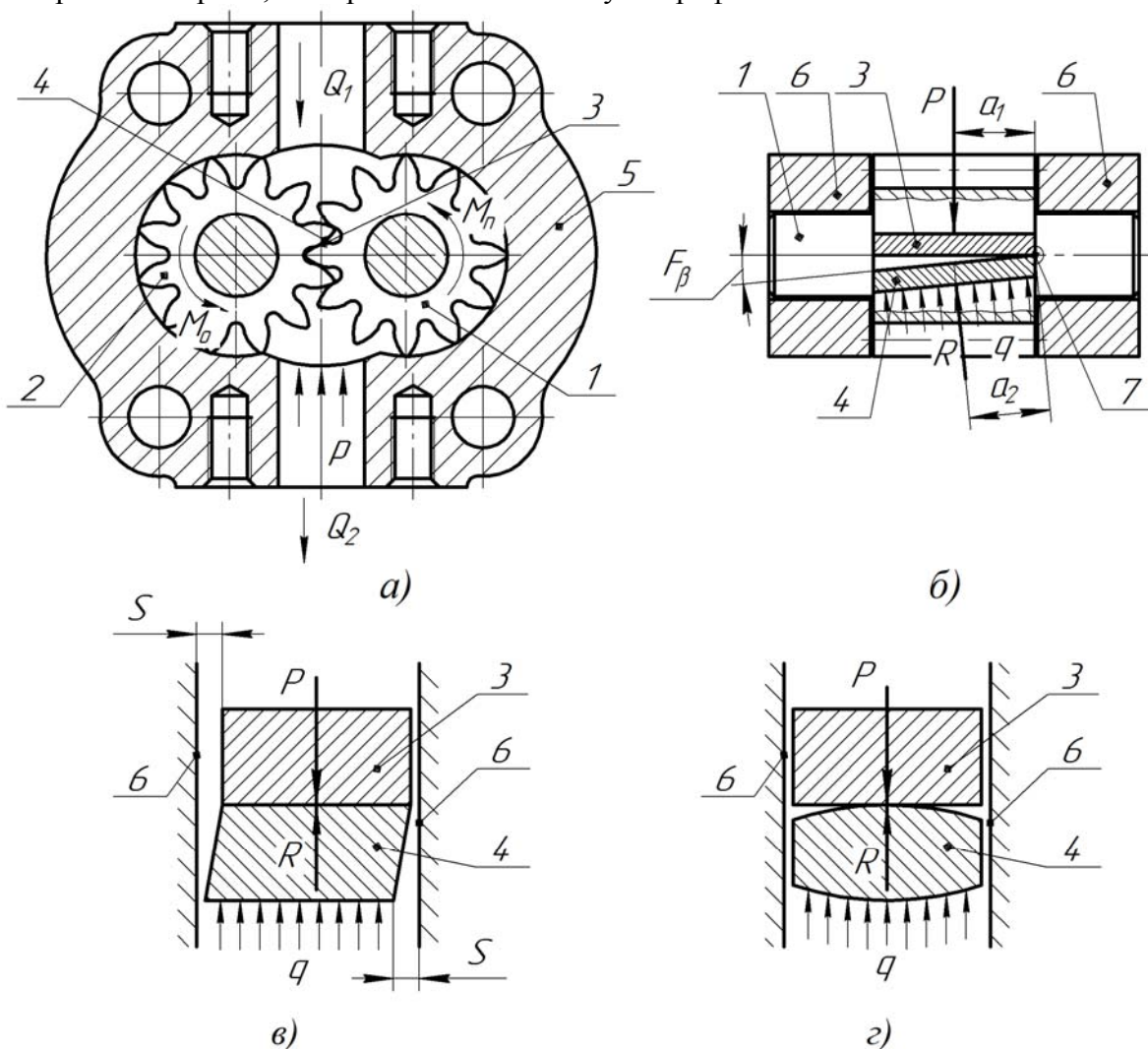
до схеми рис. 3, в:

$$q = 1 - 6 \cdot 2 + 5 \cdot 3 + 1 = 5. \quad (4)$$

Як видно із розрахунків по схемам рис. 3, найменше надлишкових зв'язків в схемі рис. 3, в. Ця схема найбільш доцільна для створення гідравлічної машини шестеренного типу. Конструктивна реалізація центрального навантаження ведучої шестерні може являти собою використання змінного елемента – вихідного валу, який має необхідний конкретному споживачеві елемент передачі крутного моменту (шліц, шпонка, тощо). Таким чином з'явиться можливість створення базових об'єктів з

постійною складовою структурою – шестеренних гідравлічних машин, та змінних об'єктів – вихідних валів необхідної конфігурації.

Розглянемо додаткові переваги вилучення надлишкових зв'язків. На рис. 4 наведені схеми взаємодії ведучої 1 та веденої 2 шестерень гідравлічної машини. Ведуча шестерня 1 під дією моменту привода M_n (рис. 4, а) передає рух веденій шестерні 2. При цьому робоча рідина із зони всмоктування Q_1 переноситься міжзубовими западинами шестерень 1 і 2 в зону тиску Q_2 . На обидві шестерні в зоні тиску Q_2 діє протилежний тиск p . Дію тиску p найбільш доцільно визначити у вигляді концентрованого навантаження q . Концентроване навантаження q діє на профілі зубців обох шестерень зі сторони, яка протилежна контакту їх профілів.



1 – ведуча шестерня; 2 – ведена шестерня; 3 – зубець ведучої шестерні; 4 – зубець веденої шестерні;
5 – корпус насоса; 6 – торцевий підшипник, 7 – точка створення моменту повороту.

Q_1 – подача рідини із зони всмоктування; Q_2 – подача рідини у зону тиску; M_n – момент привода;
 M_o – момент опору; p – тиск; F_β – похибка направлення профілю зубця; P – сила навантаження від дії
крутного моменту привода M_n ; a_1 – плече дії сили P ; R – сила опору від дії гідравлічного потоку Q_2 і тиску
 p ; a_2 – плече дії сили R ; q – концентроване навантаження від дії тиску p ; S – величина торцевого зазору.

а) схема дії сил та реакцій в корпусі шестеренного насоса; б) схема утворення сил в зубчастому
зачепленні; в) схема переміщень з утворенням зазорів при наявності перекосів в межах похибки F_β ;
г) схема компенсації перекосів за рахунок утворення бочкоподібного зубця.

Рисунок 4 – Схема взаємодії шестерень гідравлічної машини.

Джерело: розроблено автором

На схемі рис. 4, б наведені сили, які діють на обидві шестерні в зачепленні. Момент привода M_n відтворює силу P , яка в свою чергу відтворює силу реакції R від дії концентрованого навантаження q . У випадку, якщо шестерні в зачепленні мають відхилення напрямлення зубця F_β то сила P і реакція R створюють момент повороту профілю зубця відносно точки 7.

На рис. 4, в наведена схема утворення явища повороту профілю зубця 4 до повного контакту профілів шестерень 1 і 2, при умові задовільнення моменту повороту. У випадку що розглядається, торці зубця 4 взаємодіють з торцевими підшипниками 6 у положенні, яке збільшує торцевий зазор S .

Таким чином при роботі шестерень з будь яким значенням F_β можлива ситуація з виникненням збільшеного зазору S . Наявність обумовленого зазору збільшує внутрішні витікання і як наслідок знижує значення ККД гідравлічних машин. У випадку роботи гідравлічної машини в режимі мотору, можливі проблеми із створенням моменту зрушення внаслідок внутрішніх витоків.

Схема рис. 4, г реалізується за рахунок використання бочкоподібного контуру зубця в повздовжньому перерізі. В даному випадку сила P і реакція R розміщені на одній лінії з точкою дотику, що унеможливує створення моменту повороту. Таке конструктивне виконання особливо доцільне для реалізації у гідравлічних машинах, які працюють в режимі гідромотора.

Висновки. До важливих результатів дослідження слід віднести:

- визначено та обґрунтовано перспективну схему побудови шестеренної гідравлічної машини;

- виконання конструктивної схеми шестеренної гідромашини по запропонованому варіанту (рис. 3, в) забезпечить зменшення надлишкових зв'язків відносно традиційної схеми (рис. 3, а) з 7 до 5.

Синтезована схема шестеренної гідравлічної машини має ряд переваг:

- виконання однієї із спряжених шестерень з бочкоподібним повздовжнім профілем зубців:

- o забезпечить стабілізацію моменту зрушення при роботі агрегату в режимі гідромотору;

- o при роботі в режимі насосу стабілізує параметр гідравлічного ККД;

- вилучення надлишкових зв'язків в паралельних елементах, якими є шестерні в зачепленні, посприяє зменшенню додаткових деформацій і втрат енергії при роботі в режимі гідромотора і втрат рідини при роботі в режимі насосу.

- конструктивна реалізація центрального навантаження ведучої шестерні (використання змінного елемента – вихідного валу) додає можливість створення базових об'єктів з постійною складовою структурою – шестеренних гідравлічних машин, та змінних об'єктів – вихідних валів необхідної конфігурації, що спрощує вимоги по організації виробництва та складського сектору та зменшує вплив на виробництво миттєвих коливань ринкових потреб.

Список літератури

1. Bondioli & Pavesi. *Gear pumps and motors* : website. URL: <https://bondioli-pavesi.com/ru/trasmissione-di-potenza/pompe-e-motori-ad-ingranaggi> (дата звернення: 25.05.2023).
2. Parker. *Gear pumps* : website. URL: <https://ph.parker.com/us/en/series/gear-pumps1> (дата звернення: 25.05.2023).
3. Vivoil. *Products* : website. URL: <https://www.vivoil.com/products/> (дата звернення: 25.05.2023).
4. Marzocchi Pompe. *Catalogues* : website URL: <https://www.marzochipompe.com/en/public-downloads> (дата звернення: 25.05.2023).

5. *Settima. Nascosu Continuum* : website. URL: <https://www.settima.it/ru/produktsiya/nasosy-continuum/> (дата звернення: 25.05.2023).
6. *Casappa. Aluminium body hydraulic gear pumps and motors* : website. URL: <https://www.casappa.com/en/c/products/4/aluminium-body/#whisper-ws-tab> (дата звернення: 25.05.2023).
7. *Bosch Rexroth. External gear pumps* : website. URL: https://store.boschrexroth.com/Hydraulics/Pumps/External-gear-pumps?cclcl=en_GB (дата звернення: 25.05.2023).
8. *Bosch Rexroth. External gear pump «SILENCE PLUS» AZPJ. Data Sheet* : website. URL: <https://www.boschrexroth.com/en/gb/media-details/4791985e-efc7-46aa-9514-7667c522fd73> (дата звернення: 25.05.2023).
9. Підвищення подачі шестеренних насосів засобів транспорту та сільськогосподарської техніки. / Кулешков Ю. В. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 4 (36). Ч. 1. С. 197–203. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203).
10. Yang Zhou, Bowen Che, Ci Yuan. The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10(12) P.1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288>.
11. Gear pump cavitation reduction : пат. 7878781 B2 United States : МПК FOIC 2L/00. № 12/001,279 ; заявл. 11.12.2007 ; опубл. 01.02.2011.
12. Zardin B, Natali E, Borghi M. Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*. 2019. Vol. 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468>.
13. Fang Guo, Zongde Fang, Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. 2018. P. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453>.
14. Решетов Л. Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ, и доп., Москва : «Машиностроение», 1972. 131 с.

References

1. Bondioli & Pavesi. Gear pumps and motors. *bondioli-pavesi.com*. Retrieved from <https://bondioli-pavesi.com/ru/trasmisione-di-potenza/pompe-e-motori-ad-ingranaggi> [in English].
2. Parker. Gear pumps. *ph.parker.com*. Retrieved from <https://ph.parker.com/us/en/series/gear-pumps1> [in English].
3. Vivoil. Products. *vivoil.com*. Retrieved from <https://www.vivoil.com/products/> [in English].
4. Marzocchi Pompe. Catalogues. *marzochipompe.com*. Retrieved from <https://www.marzochipompe.com/en/public-downloads> [in English].
5. Settima. Continuum® pumps. *settima.it*. Retrieved from <https://www.settima.it/products/continuum-pumps/> [in English].
6. Casappa. Aluminium body hydraulic gear pumps and motors. *casappa.com*. Retrieved from <https://www.casappa.com/en/c/products/4/aluminium-body/#whisper-ws-tab> [in English].
7. Bosch Rexroth. External gear pumps. *store.boschrexroth.com*. Retrieved from https://store.boschrexroth.com/Hydraulics/Pumps/External-gear-pumps?cclcl=en_GB [in English].
8. Bosch Rexroth. External gear pump «SILENCE PLUS» AZPJ. Data Sheet. *boschrexroth.com*. Retrieved from <https://www.boschrexroth.com/en/gb/media-details/4791985e-efc7-46aa-9514-7667c522fd73> [in English].
9. Kuleshkov, Y.V., Krasota, M.V., Rudenko, T.V., et al. (2022). Pidvishhennja podachi shesterennih nasosiv zasobiv transportu ta sil's'kogospodars'koyi tehniky [Increasing the Supply of Gear Pumps for Vehicles and Agricultural Machinery]. *Central'noukrayins'kij naukovij visnik. Tehnichni nauki - Central Ukrainian National Technical University. Technical sciences, Issue 4(36), Part. 1*, 197–203 [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.197-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.197-203) [in English].
10. Yang Zhou, Bowen Che & Ci Yuan. (2018). The design and analysis of a high-speed circular arc gear pump journal bearing. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(12), P.1–11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018819288> [in English].
11. Gear pump cavitation reduction (United States Patent № 7878781 B2). (2011) [in English].
12. Zardin, B., Natali, E. & Borghi, M. (2019). Evaluation of the Hydro-Mechanical Efficiency of External Gear Pumps. *Energies*, 12(2468). DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132468> [in English].
13. Fang Guo & Zongde Fang. (2018). Experimental and theoretical study of gear dynamical transmission characteristic considering measured manufacturing errors. *Hindawi. Shock and Vibration*. P.1-20. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9645453> [in English].

14. Reshetov, L.N. (1972) *Konstruirovaniye racional'nykh mekhanizmov [Design of rational mechanisms]*. Moskov : «Mashinostroeniye» [in Russian].

Anton Aparakin, PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Modular-Parametric Principle of Design Development of Gear Hydraulic Machines

The conventional system of design development of gear-type hydraulic machines and their implementation is not sufficiently perfect for a number of reasons. This system cannot be effective in the conditions of large-scale production. The purpose of the work is to create such a principle of designing a model range of gear hydraulic machines, which optimizes the conditions of production and marketing, with the subsequent reduction of the cost of production.

To achieve the goal, the theory of "redundant connections" was used, and the design scheme of the hydraulic machine was analyzed. On the results of the conducted analysis, several possible schemes for the extraction of "redundant connections" were developed, and the calculation was carried out. From the proposed schemes, the most appropriate scheme for creating a gear-type hydraulic machine was determined - a scheme using the central load of the driving gear and a barrel-shaped profile of the longitudinal contour of the tooth of the driven gear. The paper also considers additional benefits arising from the removal of redundant connections. On the basis of the developed diagram of the action of forces in gear engagement, it is shown how deviations from the geometric accuracy of the gear affect the operation of the hydraulic machine and why the proposed scheme with a barrel-shaped profile of the longitudinal contour of the tooth is more appropriate.

Among the important results of the research should be attributed the synthesized perspective scheme of design of a gear hydraulic machine. The use of the proposed scheme will allow the reduction of redundant connections (from 7 to 5, relative to the conventional scheme), which will contribute to the reduction of additional deformations and energy losses when working in the hydraulic motor mode and fluid losses when working in the hydraulic pump mode. And the implementation of one of the coupled gears with a barrel-shaped longitudinal profile of the teeth will ensure the stabilization of the displacement moment when the unit is operating in the hydraulic motor mode and will stabilize the hydraulic efficiency parameter when operating in the pump mode.

gear pump, design, unification, redundant connections

Одержано (Received) 26.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 539.37

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.59-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.59-67)**В. В. Івлєв**, канд. техн. наук*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна**e-mail: ivliev.v.v@dsau.dp.ua*

Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу

В результаті чисельного моделювання процесу деформації сипкого матеріалу (на прикладі зернового матеріалу) отримані рівняння регресії другого порядку залежностей площі петлі пружного гістерезису і максимального значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу від його фізико-механічних властивостей (щільність, коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга). Представлені результати можуть бути використані при подальшому моделюванні або при створенні фізико-математичних моделей процесу стискання зернового матеріалу в грануляторах, екструдерах та експандерах.

сипкий матеріал, зерно, стискання, сила, деформація, пружний гістерезис, моделювання, симуляція

Постановка проблеми. Пружний гістерезис сипкого матеріалу є важливою проблемою у багатьох галузях науки і техніки, включаючи гірничо-металургійну промисловість, будівництво, енергетику та інженерію [1, 2, 3]. Це пов'язано з тим, що сипкі матеріали складаються з великої кількості частинок, які можуть зсуватися одна відносно іншої під дією зовнішніх навантажень. Цей процес супроводжується енергетичними втратами та змінами форми структури матеріалу, що в свою чергу призводить до пружного гістерезису [4].

Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу є потужним інструментом для дослідження цих процесів і визначення параметрів матеріалу. Пружний гістерезис сипкого матеріалу описується рядом рівнянь, що включають різні фізичні процеси, які відбуваються в матеріалі [5, 6, 7]. Зокрема, збереження енергії, рух частинок матеріалу, зміна форми структури та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для чисельного моделювання пружного гістерезису використовуються різні підходи, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод частинок та інші. Метод скінченних елементів використовують для моделювання різних режимів навантаження, включаючи одновісний і двовісний розтяг, згин, стиск та інші. Цей метод також може враховувати різні типи матеріалів, такі як повітряні, рідинні та гірничі, і розглядати їх взаємодію з різними структурами.

Одним з підходів до моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу є використання контактної моделі, яка включає рівняння руху для кожної частинки матеріалу та рівняння контакту між частинками. Це дозволяє враховувати взаємодію між частинками матеріалу, яка є ключовою для розуміння гістерезису.

Для використання методу скінченних елементів у моделюванні пружного гістерезису сипкого матеріалу, спочатку необхідно розбити матеріал на скінченну кількість елементів. Кожен елемент можна описати як масу з кількома ступенями вільності, які характеризують його рух. Рівняння руху елементів можуть бути записані

у вигляді диференційних рівнянь другого порядку, які можна розв'язати чисельним методом, таким як метод Рунге-Кутта [8, 9].

Для визначення рівнянь контакту між частинками матеріалу можуть використовуватися різні моделі, такі як модель зіткнення пружних сфер, модель зіткнення пружних дисків та інші. Рівняння контакту можуть включати різні параметри, такі як коефіцієнт тертя, жорсткість матеріалу та інші [10].

До переваг методу скінченних елементів входить можливість врахування різноманітних умов навантаження та різних типів матеріалів, а також можливість отримання детальної інформації про поведінку матеріалу на мікрорівні [11]. За допомогою цього методу інженери можуть вірно прогнозувати поведінку ґрунтів, зерна та інших структур під різними умовами навантаження, що дозволяє планувати та здійснювати будівельні проекти з меншим ризиком

Однак, при використанні методу скінченних елементів у моделюванні пружного гістерезису сипкого матеріалу необхідно враховувати деякі обмеження [12]. Зокрема, для точного моделювання необхідно враховувати взаємодію між кожною частинкою матеріалу, що може вимагати великої кількості обчислень, що збільшує обчислювальну складність. Крім того, результати чисельного моделювання можуть бути чутливими до вибору параметрів моделі, таких як жорсткість матеріалу та коефіцієнт тертя, що може впливати на точність прогнозування поведінки матеріалу.

У зв'язку з цим, важливо пам'ятати, що чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу є лише інструментом, який повинен бути використаний з обережністю та відповідно до конкретних умов [13, 14]. Інженери повинні ретельно аналізувати результати моделювання та враховувати можливість помилок та неточностей у вхідних даних.

Знання про поведінку матеріалу під різними умовами навантаження є необхідними для розробки безпечних та ефективних інженерних рішень.

Постановка завдання. Метою досліджень є визначення параметрів деформації сипкого матеріалу (на прикладі зернового матеріалу) в залежності від його фізико-механічних властивостей в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Виклад основного матеріалу. Для чисельного моделювання приймаємо, що деформація сипкого (зернового) матеріалу відбувається під дією поршня (plunger) на зерно (grain), яке знаходиться в циліндричній ємності (cylinder). Розрахункову схему і геометричні розміри наведено на рис. 1.

В якості фізичних моделей повинні бути обрані наступні: безсіткова DEM (meshfree DEM), інтерполяція рішення (Solution Interpolation), Лагранжева багатофазність (Lagrangian Multiphase), нестационарний неявний (Implicit Unsteady), багатофазна взаємодія (Multiphase Interaction), сила тяжіння (Gravity), модель дискретних елементів DEM (Discrete Element Model (DEM)), граничні сили DEM (DEM Boundary Forces). В якості Лагранжевої фази (Lagrangian Phases) задано зерно (grain) з наступними моделями: сферичні частинки (Spherical Particles), суцільна (Solid), частинка DEM (DEM Particles), постійна щільність (Constant Density), час існування (Residence Time). В якості фазової взаємодії зерно-зерно (grain-grain) обрані наступні моделі: фазова взаємодія DEM (DEM Phase Interaction), Hertz Mindlin, опір кочення (Rolling Resistance), лінійне зчеплення (Linear Cohesion). В якості фазової взаємодії зерно-стінка (grain-wall) обрані наступні моделі: Hertz Mindlin, фазова взаємодія DEM (DEM Phase Interaction), опір кочення (Rolling Resistance). Для області циліндричної ємності (cylinder) обрано область частинок (Particle Region). Для області поршня (plunger) обрано область твердого тіла (Solid Region). Для області поршня (plunger) нижня площина повинна бути виділена окремо і мати назву force. Інжектор (Injectors) зерна (grain) має тип випадкового інжектора (Random Injector) на область циліндричної

ємності (cylinder). Умова упаковки частинок (Particle Packing Specification) – лічильник частинок (Particle Count). Діаметр зерна (grain) приймаємо 0,005 м. Число частинок (Number of Particles) – 6000.

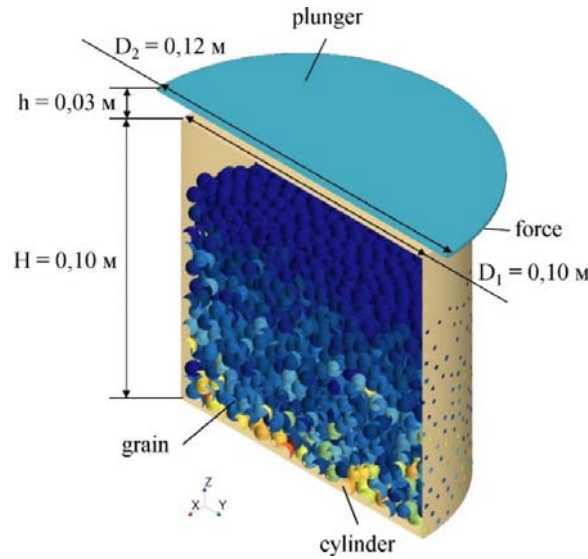


Рисунок 1 – Розрахункова схема дослідження деформації зернової суміші

Джерело: розроблено автором

Налаштування розв'язувача (Solvers): крок часу (Time-Step) - 0,001 секунди, параметри зупинки (Stopping Criteria), максимальний фізичний час (Maximum Physical Time) – 2,5 секунди, максимальна кількість кроків (Maximum Steps) вимкнена, максимальна кількість внутрішніх ітерацій (Maximum Inner Iterations) – 1. Параметри руху поршня: зсув (Translation), швидкість зсуву (Translation Velocity) – [0.0, 0.0, \$Time < 1.5 ? -0.05 : 0.05\$].

В результаті моделювання створено графік залежності сили, що діє на поршень від деформації суміші зерна і дві сцени візуалізації. Сцена відображення розподілу сил, що діють на зерно наведена на рис. 2. Сцена – скалярна. Функція – Compression Force. На сцені повинна відобразитися анотація (Annotations): Solution Time, grain. Анотація grain створюється користувачем зі створеного звіту.

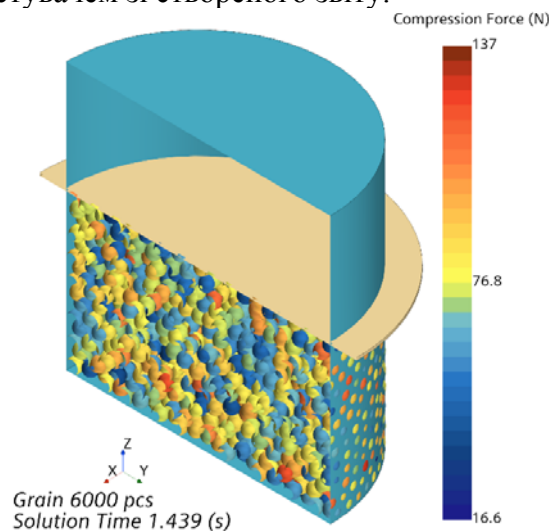


Рисунок 2 – Загальний вигляд сцени відображення розподілу сил F , що діють на зерно

Джерело: розроблено автором

Для подальшої оцінки процесу було створено три звіти. Перший з них – grain – містить інформацію про кількість елементів (Element Count), розділену на частини, які називаються «зерно» (grain). Звідси генерується анотація (Annotations) з назвою «grain». У текстових параметрах (Text) необхідно вказати «Grain \$grainReport шт.» (Grain \$grainReport pcs.), щоб вказати кількість елементів у звіті. Другий звіт – position – підсумковий звіт (Sum report). Функція поля (Field Function) – Position[Z]. Частина (Parts) – plunger: force. Третій звіт – force – підсумковий звіт (Sum report). Функція поля (Field Function) – Average DEM Total Force[k]. Частина (Parts) – plunger: force. З другого і третього звіту створюються монітори і єдиний графік (plot). Графік налаштовується таким чином, щоб його вигляд був, як на рис. 3.

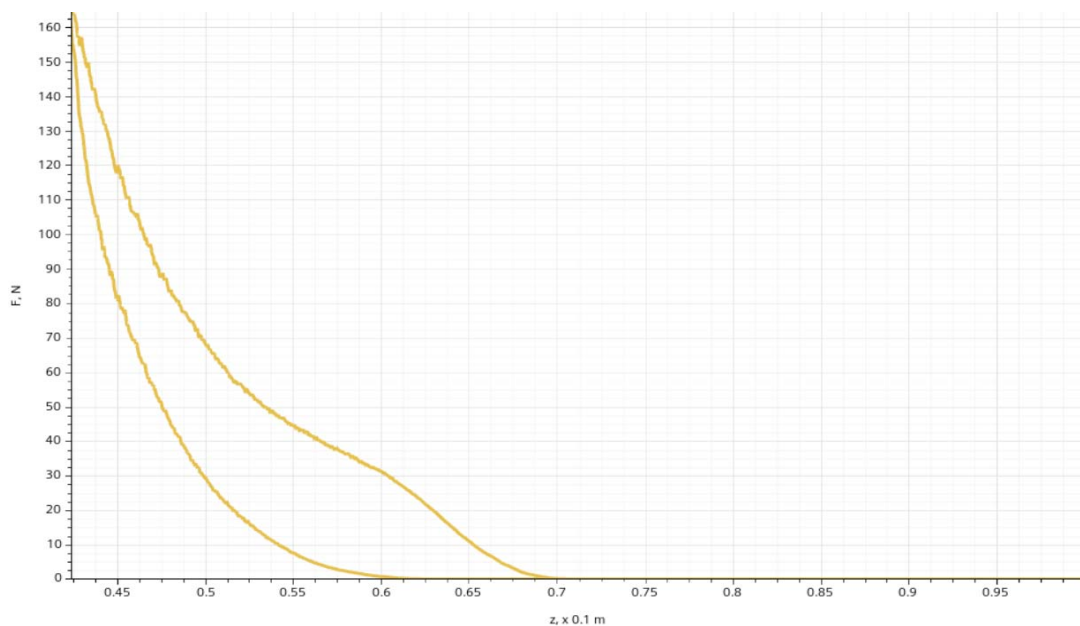


Рисунок 3 – Графік залежності сили, що діє на поршень від деформації суміші зерна

Джерело: розроблено автором

В якості першого критерію оцінки процесу обрано площу s , яка знаходиться всередині петлі пружного гістерезису. Її фізична сутність полягає в тому, що вона чисельно дорівнює незворотній питомій енергії (роботі), що перетворюється при виконанні кожного циклу деформації на теплову енергію. Для розрахунку площі s необхідно імпортувати отримані дані в формат .csv із зазначенням способу розділення – табуляція (tab). Далі отримані дані обробити в програмному пакеті Excel і визначити величину s .

В якості другого критерію оцінки процесу обрано максимальне значення сили $F_{0,25}$ при 25 % відносній деформації, що діє на зерно. Це максимальне значення сили F визначають зі сцени відображення розподілу сил (рис. 2).

В якості факторів дослідження приймаємо наступні фізико-механічні властивості зерна: щільність (Density) ρ , коефіцієнт Пуассона (Poisson's Ratio) μ , модуль Юнга (Young's Modulus) E . Рівні і межі варіювання факторами в залежності від варіанту наведено в табл. 1.

У плані досліджень передбачається варіювання трьома рівнями трьох факторів дослідження. Для кожного досліду збережено зображення сцени відображення розподілу сил і графіки залежності сили, що діє на поршень від деформації суміші зерна. Окрім цього сформована узагальнена таблиця із значенням площі s , яка

знаходиться всередині петлі пружного гістерезису і максимальне значення сили $F_{0,25}$, що діє на зерно.

Таблиця 1 – Рівні і межі варіювання факторами досліджень

Факторний рівень	Щільність ρ , кг/м ³ (x_1)	Коефіцієнт Пуассона μ (x_2)	Модуль Юнга E , МПа (x_3)
-1	700	0,15	2,0
0	900	0,25	3,0
+1	1100	0,35	4,0
Інтервал	200	0,10	1,0

Джерело: розроблено автором

Далі складено програму розрахунку рівняння регресії в програмному пакеті Wolfram Cloud.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud встановлені рівняння регресії зміни площі s , яка знаходиться всередині петлі пружного гістерезису і максимального значення сили $F_{0,25}$ від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$s = 319,698 + 8,01092 x_1 - 7,26438 x_1^2 - 1,32561 x_2 - 0,932975 x_1 x_2 - 9,43986 x_2^2 + 77,2427 x_3 - 5,18492 x_1 x_3 + 2,21562 x_2 x_3 - 2,73488 x_3^2, \quad (1)$$

$$F_{0,25} = 735,233 + 9,43613 x_1 - 2,34149 x_1^2 + 36,2932 x_2 + 0,325733 x_1 x_2 + 14,4768 x_2^2 + 230,609 x_3 - 0,141617 x_1 x_3 + 11,6366 x_2 x_3 + 3,04546 x_3^2. \quad (2)$$

Результати статистичної обробки рівнянь (1) і (2) представлено в табл. 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2 – Результати статистичної обробки рівняння регресії (1)

Коефіцієнт регресії	Значення	Стандартна помилка	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
a_{00}	319,698	10,875	88,1928	$5,12517 \cdot 10^{-16}$
a_{10}	8,01092	5,03413	4,77396	0,12996
a_{20}	-1,32561	5,03413	-0,78997	0,795466
a_{30}	77,2427	5,03413	46,0314	$2,15982 \cdot 10^{-11}$
a_{12}	-0,932975	6,16552	-0,45396	0,881503
a_{13}	-5,18492	6,16552	-2,52286	0,412047
a_{23}	2,21562	6,16552	1,078071	0,723753
a_{11}	-7,26438	8,71936	-2,4994	0,416323
a_{22}	-9,43986	8,71936	-3,24789	0,29409
a_{33}	-2,73488	8,71936	-0,94097	0,757598

Джерело: розроблено автором

Провівши порівняння розрахованого критерію Стьюдента із табличним значенням $t_{0,05}(27) = 2,05$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії:

$$s = 319,698 + 8,01092 x_1 - 7,2643 x_1^2 - 9,43986 x_2^2 + 77,2427 x_3 - 5,1849 x_1 x_3, \quad (3)$$

$$F_{0,25} = 735,233 + 9,4361 x_1 + 36,293 x_2 + 14,477 x_2^2 + 230,61 x_3 + 11,636 x_2 x_3. \quad (4)$$

Розкодуємо рівняння (3) і (4):

$$s = -224,178 + 100,575 E + 0,444725 \rho - 0,0259246 E \rho - 0,000181609 \rho^2 + 471,993 \mu - 943,986 \mu^2, \quad (5)$$

$$F_{0,25} = 87,9644 + 201,518 E + 0,0471806 \rho - 710,005 \mu + 116,366 E \mu + 1447,68 \mu^2. \quad (6)$$

Графіки рівнянь (5) і (6) приведені на рис. 4.

Таблиця 3 – Результати статистичної обробки рівняння регресії (2)

Коефіцієнт регресії	Значення	Стандартна помилка	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
a_{00}	735,233	5,68605	129,305	$6,88896 \cdot 10^{-27}$
a_{10}	9,43613	2,63213	3,58498	0,00228212
a_{20}	36,2932	2,63213	13,7885	$1,16888 \cdot 10^{-10}$
a_{30}	230,609	2,63213	87,6131	$5,10195 \cdot 10^{-24}$
a_{12}	0,325733	3,22369	0,101044	0,920698
a_{13}	-0,141617	3,22369	-0,04393	0,965472
a_{23}	11,6366	3,22369	3,60972	0,00216278
a_{11}	-2,34149	4,55899	-0,5136	0,614142
a_{22}	14,4768	4,55899	3,17544	0,00553222
a_{33}	3,04546	4,55899	0,668012	0,513094

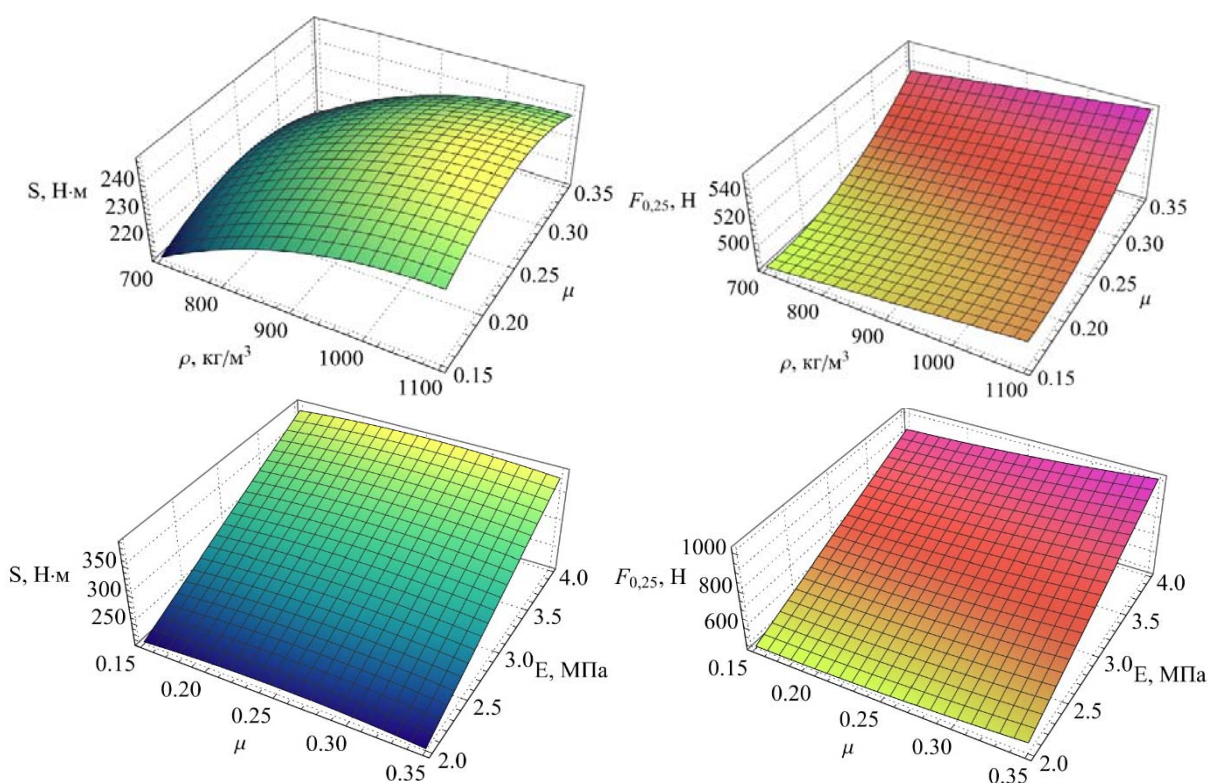


Рисунок 4 – Графіки залежності площі петлі пружного гістерезису s і максимального значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу $F_{0,25}$ від його фізико-механічних властивостей

Джерело: розроблено автором

Аналіз рис. 4 і рівнянь (5) і (6) дає змогу стверджувати, що зі збільшенням щільності зернового матеріалу ρ і модуля Юнга E площа петлі пружного гістерезису s і максимальне значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу $F_{0,25}$ збільшується. Для коефіцієнта Пуассона μ зернового матеріалу спостерігається цікавий характер залежності. Так сила $F_{0,25}$ збільшується зі збільшенням коефіцієнта Пуассона μ , а площа петлі пружного гістерезису s має максимальне значення 212,5 Н·м при $\mu = 0,23$. Петля пружного гістерезису відображає поведінку матеріалу при циклічному навантаженні, коли відбуваються зміни деформації та напруження. Площа петлі s є мірою втрат енергії матеріалом, які відбуваються під час циклічного навантаження.

Таким чином, рівняння (5) можна використовувати для розрахунку площі петлі пружного гістерезису для різних зернових матеріалів з різними значеннями щільності, коефіцієнта Пуассона та модуля Юнга.

Висновки. В результаті чисельного моделювання процесу деформації сипкого матеріалу (на прикладі зернового матеріалу) отримані рівняння регресії другого порядку залежностей площі петлі пружного гістерезису s і максимального значення сили при 25 % відносній деформації зернового матеріалу $F_{0,25}$ від його фізико-механічних властивостей (щільність ρ , коефіцієнт Пуассона μ і модуль Юнга E). Представлені результати можуть бути використані при подальшому моделюванні або при створенні фізико-математичних моделей процесу стискання зернового матеріалу в грануляторах, екструдерах та експандерах.

Список літератури

1. Дідух Л.Д. Механіка: підручник. Тернопіль: підр. і посіб., 2016. 428 с.
2. Faraji G., Kim H.S., Kashi H.T. Chapter 2 – Severe Plastic Deformation Methods for Bulk Samples. Severe Plastic Deformation. Methods. Processing and Properties, 2018. P. 37-112. Doi: 10.1016/B978-0-12-813518-1.00002-3
3. Perez-Gonzalez E.L., Bilodeau J.-P., Dore G. Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles. Transportation Geotechnics. 2021. Vol. 28. 100536. Doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100536
4. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підр. / О.М. Царенко та ін.; за ред. Яцуна С.С. К.: Мета, 2003. 448 с.
5. Івлєв В.В. Дослідження явища пружного гістерезису під час ударно-механічної взаємодії грубої овечої вовни. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: зб. наук праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*. 2018. Вип. 22 (36). С. 259-263.
6. Дослідження динаміки деформації зволоженої грубої овечої вовни при ущільненні / Е.Б. Алієв, В.В. Лиходід, В.М. Забудченко, В.В. Івлєв. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2015. Вип. 28. С. 132-138.
7. Лабатюк Ю., Алієв Е. Розрахунок сили опору деформації ґрунту під дією робочого органа глибокорозпушувача. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 46-52.
8. Чисельні методи: навч. посіб. / Л.О. Волонтир, О.В. Зелінська, Н.А. Потапова, І.А. Чіков. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с.
9. Simcenter STAR-CCM+ 2021.3. Verification Suite, 2021. 333 p.
10. Stillinger, Frank H.; Lubachevsky, Boris D. Crystalline-amorphous interface packings for disks and spheres. *Journal of Statistical Physics*. 1993. 73 (3–4): 497–514. Doi: 10.1007/bf01054337.
11. Банніков Д.О., Тютюкін О.Л. Перспективні напрями розвитку механіки сипучого середовища. *Наука та інновації* – . 2020. Т. 16, № 2. С. 45-54. Doi: 10.15407/scin16.02.045.
12. Алієв Е.Б. Динаміка деформації розтягування руна грубої овечої вовни. *Вісник Степу. Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України : наук. зб.* 2015. Вип. 12. С. 169-171.
13. Franklin S.V., Shattuck M.D. Handbook of Granular Materials. CRC Press, 2015. 522 p. Doi: 10.1201/b19291
14. Aliiev E., Dudin V., Linko M. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 2022. 13(3). Pp. 9-16. Doi: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16

References

1. Didukh, L.D. (2016). *Mekhanika: pidruchnyk [Mechanics: a textbook]*. Ternopil': Pidruchnyky i posibnyky [in Ukrainian].
2. Faraji, G., Kim, H.S. & Kashi, H.T. (2018). Chapter 2 – Severe Plastic Deformation Methods for Bulk Samples. Severe Plastic Deformation. Methods. Processing and Properties. P. 37-112. Doi: 10.1016/B978-0-12-813518-1.00002-3 [in English].

3. Perez-Gonzalez, E.L., Bilodeau, J.-P. & Dor, G. (2021). Analysis model for permanent deformation in granular materials under the action of superheavy vehicles. *Transportation Geotechnics, Vol. 28*, 100536. Doi: 10.1016/j.trgeo.2021.100536 [in English].
4. Tsarenko, O.M., Voytyuk, D.H., Shvayko, V.M. et al. (2003). *Mekhaniko-tekhnologichni vlastyivosti sil's'kohospodars'kykh materialiv [Mechanical and technological properties of agricultural materials]*. S.S. Yatsuna (Eds). Kyiv: Meta [in Ukrainian].
5. Ivlyev, V.V. (2018). Doslidzhennya yavlyshcha pruzhnoho histerezyu pid chas udarno-mekhanichnoyi vzayemodiyi hruboyi ovechoyi vovny [Study of the phenomenon of elastic hysteresis during shock-mechanical interaction of coarse sheep's wool]. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniki i tekhnolohiy dlya sil's'koho hospodarstva Ukrayiny : zb. nauk prats' UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho – Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine: coll. of Labor Sciences of UkrNDIPVT named after L. Pogorily, Issue 22 (36)*, 259-263. [in Ukrainian].
6. Aliiev, E.B., Lykhodid, V.V., Zabudchenko, V.M. & Ivlyev, V.V. (2015). Doslidzhennya dynamiky deformatsiyi zvolozhenoyi hruboyi ovechoyi vovny pry ushchil'nenni [Study of the dynamics of deformation of moistened coarse sheep's wool during compaction]. *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya – Machinery in Agricultural Production, Industrial Engineering, Automation, Issue 28*, 132-138. [in Ukrainian].
7. Labatyuk, Yu. & Aliyev, E. (2014). Rozrakhunok syly oporu deformatsiyi gruntu pid diyeyu robochoho orhana hlybokorozpushuvacha [Calculation of the resistance force of soil deformation under the action of the working body of a deep loosener]. *Visnyk Lviv's'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu: ahroinzhenerni doslidzhennya – Bulletin of the Lviv National Agrarian University: agricultural engineering research, 18*, 46-52 [in Ukrainian].
8. Volontyr, L.O, Zelins'ka, O.V., Potapova, N.A. & Chikov, I.A (2020). *Chysel'ni metody: Navchal'nyy posibnyk [Numerical methods: Tutorial]*. Vinnytsya: VNAU [in Ukrainian].
9. Simcenter STAR-CCM+ 2021.3. Verification Suite. 2021. 333 p. [in English].
10. Stillinger, Frank H. & Lubachevsky, Boris D. (1993) Crystalline-amorphous interface packings for disks and spheres. *Journal of Statistical Physics. 73 (3–4)*: 497–514. Doi: 10.1007/bf01054337 [in English].
11. Bannikov, D.O &, Tyut'kin, O.L. (2020). Perspektyvni napryamy rozvytku mekhaniky sypuchoho seredovyscha [Prospective directions of development of the mechanics of bulk media]. *Nauka ta innovatsiyi – Science and Innovation, Vol. 16, № 2*, 45-54. Doi: 10.15407/scin16.02.045 [in Ukrainian].
12. Aliiev, E.B. (2015). Dynamika deformatsiyi roztyahuvannya runa hruboyi ovechoyi vovny [Dynamics of the deformation of the stretching of the fleece of coarse sheep's wool]. *Stan ta perspektyvy rozvytku ahropromysloвого vyrobnytstva Ukrayiny: Visnyk Stepu. Naukovyy zbirnyk – Herald of the Steppe. State and prospects of the development of agro-industrial production of Ukraine: Science. coll., Issue. 12*, 169-171. [in Ukrainian].
13. Franklin, S.V. & Shattuck, M.D. (2015). *Handbook of Granular Materials*. CRC Press. Doi: 10.1201/b19291 [in English].
14. Aliiev, E., Dudin, V. & Linko, M. (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics, 13(3)*, 9-16. Doi: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16 [in English].

Vitalii Ivliev, PhD tech sci.

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Numerical Modeling of Elastic Hysteresis of Loose Material

The elastic hysteresis of bulk material is an important problem in many fields of science and technology, including mining and metallurgy, construction, energy, and engineering. This is due to the fact that loose materials consist of a large number of particles that can shift relative to each other under the influence of external loads. This process is accompanied by energy losses and changes in the shape of the material structure, which in turn leads to elastic hysteresis.

Knowledge of material behavior under various loading conditions is essential for developing safe and effective engineering solutions.

The purpose of the research is to determine the parameters of the deformation of loose material (for example, granular material) depending on its physical and mechanical properties in the Simcenter STAR-CCM+ software package.

The elastic hysteresis loop reflects the behavior of the material under cyclic loading, when strain and stress changes occur. Loop area is a measure of material energy losses that occur during cyclic loading.

As a result of numerical modeling of the process of deformation of loose material (on the example of granular material), the regression equations of the second order of the dependences of the area of the elastic

hysteresis loop and the maximum force value at 25% relative deformation of the granular material from its physical and mechanical properties (density, Poisson's ratio and Young's modulus) were obtained. The presented results can be used in further modeling or in the creation of physico-mathematical models of the process of compression of grain material in granulators, extruders and expanders.

bulk material, grain, compression, force, deformation, elastic hysteresis, modeling, simulation

Одержано (Received) 16.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 19.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 631.362

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.67-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.67-74)

Е.Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст.дослідник, **К.О. Лупко**, здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра

Метою є експериментальне обґрунтування основних параметрів та режимів роботи селекційно-насінницького трієра дрібнонасінневих культур, розробка алгоритму роботи і програмного забезпечення відповідної мехатронної системи. Для проведення експериментальних досліджень розроблено й створено лабораторний селекційно-насінницький трієр. Для зміни частоти обертання циліндра і напрямку обертання використано плату керування Arduino UNO і драйвер електродвигуна постійного струму L298N. Керувати частотою і напрямком обертання циліндра можна в ручному режимі з використанням потенціометра і автоматичному з використанням монітор-порту Arduino IDE. Робочим органом трієра є циліндр, який складається з пластин із чарунками. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі отримано залежності зміни мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 , частоти обертання циліндра n та вмісту домішок f_0 . Отримані залежності увійшли до програмного забезпечення системи керування мехатронної системи, яке дозволяє налаштувати положення лотка для збору насіння в результаті керування сервоприводом.

насіння, домішки, очищення, розділення, сепарація, трієр, параметри, керування, мехатронна система, насіння, ефективність

Постановка проблеми. Однією з важливих задач агропромислового виробництва є розширення асортименту насінневого матеріалу, щоб задовольнити зростаючі потреби різних фермерських господарств. Однак при досягненні певного рівня виробництва насінневого матеріалу виникає перевантаження на насіннеочисну техніку, що призводить до порушення технології потокової післязбиральної обробки насіння [1, 2].

Якість обробленого насінневого матеріалу в значній мірі залежить від відповідності технічних засобів об'єму та раціональної технології післязбиральної обробки насіння [3]. Існуючі технологічні лінії для обробки насіння не забезпечують можливості відбору високоякісного насіння без додаткових витрат та ефективність його очищення від домішок за довжиною.

В Україні заклади, які займаються селекційно-насінницькою роботою та очищенням насіння різних сільськогосподарських культур, використовують старі машини, такі як трієри, які були виготовлені більше 20 років тому. Ці машини фізично зношені, а їх конструкції потребують модернізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з чинним державним стандартом України ДСТУ 2240-93 [4], якість насіння дрібнонасінневих культур визначається зокрема за їх сортовою чистотою, яка для елітного насіння (еліта, супереліта) повинна бути в межах 99,6-99,9% в залежності від культури. Згідно з Державною цільовою програмою розвитку аграрного сектору [5], важливим завданням є стимулювання збільшення виробництва доbazового та базового насіння вітчизняних сільськогосподарських культур.

Проведений аналіз висновків, які були отримані від науковців та фахівців компаній Bühler Schmidt-Seeger, Denis Prive, NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH, PETKUS Technologie GmbH (Німеччина), Zanin F.lli s.r.l. (Іспанія), Westrup (Данія), Акурек (Туреччина), підтвердив широкий спектр технологій та технічних засобів, які використовуються для післязбиральної переробки насіння і підготовки насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур. Однак навіть комплексний підхід, що включає використання універсальних очисних машин, не забезпечує можливість систематизувати та розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насіння для різних сортів дрібнонасінневих культур, таких як льон, гірчиця, ріпак, рижій, шавлій, амарант та інші [6]. Один з варіантів розв'язання цієї проблеми полягає в поліпшенні наявних технічних засобів для сепарації шляхом створення мехатронних систем автоматизованого керування їх конструктивними та режимними параметрами.

На результати сортування насінневого матеріалу впливають різні індивідуальні фізичні характеристики насіння [7]. Фізичні характеристики включають розмір, довжину, вагу, форму, колір та інші параметри [8]. Без аналізу фізичних характеристик різних видів насіння неможливо вдосконалювати сучасні насіннеочисні машини [9, 10] або розробляти нові типи обладнання [11, 12]. Огляди характеристик, які були опубліковані [13, 14], допомагають сформулювати сучасну технологічну лінію для процесів сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур, враховуючи їх фізико-механічні властивості.

Для поділу насінневої суміші за розміром можна використовувати наступне обладнання: решітки з круглими або прямокутними отворами для розділення за шириною та товщиною, а трієри для розділення за довжиною [3, 6, 15].

У зв'язку з цим, в рамках проведених досліджень передбачається розробка мехатронної системи для селекційно-насінницького трієра та обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів. Застосування цієї системи дозволить здійснювати процес сепарації з меншими експлуатаційними витратами та збільшеною продуктивністю.

Постановка завдання. Метою є експериментальне обґрунтування основних параметрів та режимів роботи селекційно-насінницького трієра дрібнонасінневих культур, розробка алгоритму роботи і програмного забезпечення відповідної мехатронної системи.

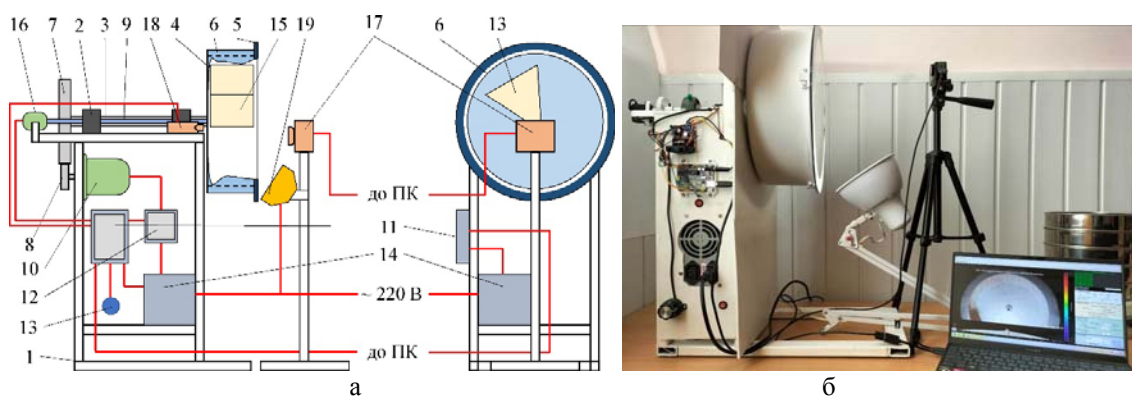
Виклад основного матеріалу. Для проведення експериментальних досліджень розроблено й створено лабораторний селекційно-насінницький трієр (рис. 1). Робочим органом циліндричного чарункового трієра є циліндр, який складається з пластин із чарунками. Пластини надруковані на 3D-принтері Anycubic S із ABS+ пластика.

Для зміни частоти обертання циліндра і напрямку обертання використано плату керування Arduino UNO і драйвер електродвигуна постійного струму L298N. Керувати

частотою і напрямом обертання циліндра можна в ручному режимі з використанням потенціометра і автоматичному з використанням монітор-порту Arduino IDE. Контроль за частотою обертання циліндра здійснено ІЧ-сенсором, який відкалібрований тахометром контактним Venetech GM8906. Пластини із чарунками закріплюються між собою і циліндром з використанням з'єднувальних замків, що унеможлиблює випадкове зміщення пластин під час обертання циліндра. Лоток має можливість швидко зніматися з лабораторної установки.

В якості об'єкту досліджень обрано насіння гірчиці сорту Запоріжанка, ріпаку сорту Атлант і рижій сорту Престиж.

Процес досліджень селекційно-насінницького трієра проводився наступним чином. Спочатку підготовлювалися навіски вихідного насіннєвого матеріалу із домішками. Імітацією домішок виступало насіння льону. Маса вихідного матеріалу насіння M_0 і вміст домішок f_0 є факторами досліджень (табл. 1).



1 – станина; 2 – підшипники; 3 – порожній вал; 4 – циліндр; 5 – скляна кришка; 6 – пластины із чарунками; 7 – шків відомий; 8 – шків ведучий; 9 – суцільний вал; 10 – електродвигун постійного струму; 11 – плата керування Arduino UNO; 12 – драйвер електродвигуна постійного струму L298N; 13 – потенціометр; 14 – блок живлення; 15 – лоток; 16 – сервопривід; 17 – відеокамера Aspiring Repeat 4 Ultra HD 4K Dual Screen; 18 – ІЧ-сенсор; 19 – лампа холодного білого освітлення (5000–6500K)

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) лабораторного селекційно-насінницького трієра

Джерело: розроблено авторами

Масу вихідного матеріалу і домішок визначали з використанням електронних ваг JD-2200-2 виробництва ТОВ «Центровес» (абсолютна похибка вимірювання 0.01 г). На першому етапі досліджень лоток відсутній. Навіску вихідного насіннєвого матеріалу із домішками розміщали у циліндрі. На платі керування електродвигуном встановлювали частоту обертання валу електродвигуна і відповідно циліндра. Напрямок обертання циліндра за годинниковою стрілкою. Частота обертання циліндра є фактором досліджень. Після запуску електродвигуна включається відеокамера і фіксується робота циліндричного чарункового трієра.

Для оцінки якості роботи селекційно-насінницького трієра отримане відео з відеокамери необхідно наочно проаналізувати і розрахувати траєкторії руху насінин під час їх польоту в циліндрі. Для цього необхідно спеціалізоване програмне забезпечення. В результаті інформаційного пошуку визначено базовий програмний код TracTrac, який розроблений Йорисом Хейманом [16, 17]. Код є повністю відкритим і написаний на мові програмування Python з використанням відкритої бібліотеки OpenCV. Однак для поставлених задач необхідно удосконалити дане програмне забезпечення.

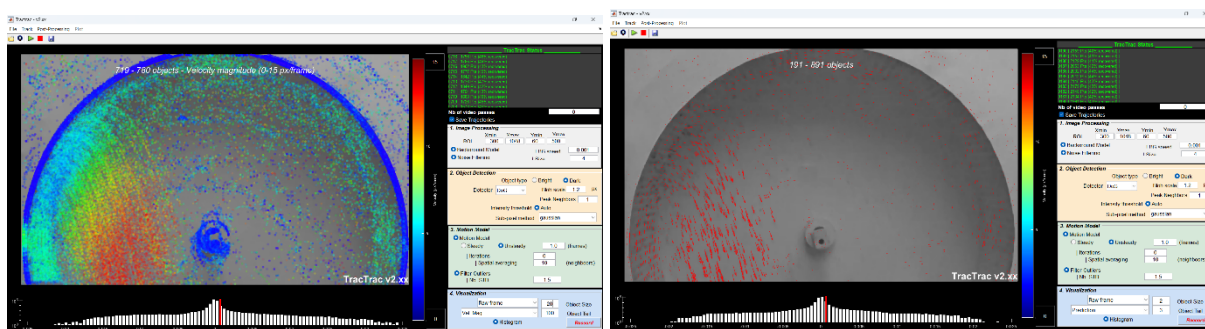


Рисунок 2 – Візуалізація удосконаленого програмного пакету TracTrac для визначення траєкторії польоту насінин при їх русі в селекційно-насінницькому трієрі
 Джерело: розроблено авторами

В якості критерію оцінки процесу сепарації циліндричного чарункового трієра прийнято траєкторію польоту насінин. В результаті досліджень отриманих траєкторій визначено максимальний θ_{max} та мінімальний θ_{min} кути повороту на моментах сходу першого компоненту насінневого матеріалу та останнього.

Таблиця 1 – Фактори експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі

Фактор	Код	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Маса вихідного матеріалу насіння M_0 , кг	x_6	0,1	0,2	0,3	0,1
Частота обертання циліндра n , об/хв	x_2	34	40	46	6
Вміст домішок f_0 , %	x_7	10	30	50	20

Джерело: розроблено авторами

Матриця планування трифакторного експерименту за повнофакторним дослідом. Загальна кількість дослідів – 27. Повторність – триразова.

Обробка результатів проведених досліджень за методом факторного планування експерименту виконується з використанням програмного пакету Wolfram Cloud. Умови однорідності дослідів означають, що помилки мають приблизно однаковий вплив на всі точки, що включені до плану дослідів. Для перевірки відтворення дослідів, які виконувалися у трьохкратній повторності, використовують критерій Кохрена. Адекватність отриманих моделей перевірялась за допомогою критерію Фішера. Для перевірки значимості коефіцієнтів регресії використовується метод визначення довірчого інтервалу. Коефіцієнт регресії вважається значимим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу, який обчислюється за допомогою t-критерію Стьюдента.

Обробка отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку, яке показує залежність значень мінімального θ_{min} і максимального θ_{max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\theta_{min} = 0,22845 + 0,0823248 x_6 + 0,0164483 x_6^2 + 0,0977746 x_2 + 0,0235159 x_6 x_2 + 0,00354167 x_6^2 - 0,00520833 x_7 - 0,0003125 x_6 x_7 - 0,003125 x_2 x_7 + 0,00270833 x_7^2, \tag{1}$$

$$\theta_{max} = 0,785097 + 0,0401852 x_6 - 0,00104938 x_6^2 + 0,207715 x_2 + 0,00627778 x_6 x_2 - 0,000493827 x_2^2 - 0,0045679 x_7 - 1,14146 \cdot 10^{-16} x_6 x_7 + 0,00222222 x_2 x_7 + 0,0000617284 x_7^2. \tag{2}$$

Статистична обробка рівнянь (1) і (2) приведені в таблицях 2 і 3 відповідно.

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(27) = 2,05$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (1) і (2):

$$\theta_{\min} = 0,22845 + 0,0823248 x_6 + 0,0164483 x_6^2 + 0,0977746 x_2 + 0,0235159 x_6 x_2 - 0,00520833 x_7 - 0,003125 x_2 x_7, \quad (3)$$

$$\theta_{\max} = 0,785097 + 0,0401852 x_6 + 0,20771 x_2 + 0,006277 x_6 x_2 - 0,004567 x_7. \quad (4)$$

Статистичний аналіз рівнянь (3) і (4) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,89 і 0,88 відповідно. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(4,3)} = 2,12 < F_T = 2,49$ і $F_{(4,4)} = 2,21 < F_T = 2,49$ відповідно. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Підставляючи в рівняння (1)–(2) замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\theta_{\min} = -0,0747216 + 0,00078125 f_0 - 1,40241 M_0 + 1,64483 M_0^2 + 0,00136801 n - 0,0000260417 f_0 n + 0,0391932 M_0 n + 0,0000983796 n^2, \quad (5)$$

$$\theta_{\max} = -0,589487 - 0,000228395 f_0 - 0,0166667 M_0 + 0,0325266 n + 0,010463 M_0 n. \quad (6)$$

Таблиця 3 – Результати статистичної обробки рівняння (1)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a_{00}	0,22845	0,00228006	100,195	$5,23448 \cdot 10^{-25}$
a_{60}	0,0823248	0,00105546	77,9987	$3,66357 \cdot 10^{-23}$
a_{20}	0,0977746	0,00105546	92,6366	$1,98117 \cdot 10^{-24}$
a_{70}	-0,00520833	0,00105546	-4,93464	0,000125665
a_{62}	0,0235159	0,00129267	18,1917	$1,3999 \cdot 10^{-12}$
a_{63}	-0,0003125	0,00129267	-0,241747	0,811868
a_{27}	-0,003125	0,00129267	-2,41747	0,027149
a_{66}	0,0164483	0,00182812	8,99739	$7,11546 \cdot 10^{-8}$
a_{22}	0,00354167	0,00182812	1,93733	0,0695023
a_{77}	0,00270833	0,00182812	1,48149	0,156775

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Результати статистичної обробки рівняння (2)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a_{00}	0,785097	0,00212863	368,828	$1,2668 \cdot 10^{-34}$
a_{60}	0,0401852	0,000985363	40,7821	$2,11641 \cdot 10^{-18}$
a_{20}	0,207715	0,000985363	210,801	$1,706 \cdot 10^{-30}$
a_{70}	-0,0045679	0,000985363	-4,63575	0,000236365
a_{62}	0,00627778	0,00120682	5,20192	0,0000719783
a_{63}	$-1,1414 \cdot 10^{-16}$	0,00120682	$-9,45841 \cdot 10^{-14}$	1
a_{27}	0,00222222	0,00120682	1,84139	0,0830827
a_{66}	-0,00104938	0,0017067	-0,614861	0,546789
a_{22}	-0,000493827	0,0017067	-0,289346	0,775815
a_{77}	0,0000617284	0,0017067	0,0361683	0,971569

Джерело: розроблено авторами

Графічна інтерпретація залежностей (5)–(6) представлена на рис. 3 при фіксованих значеннях факторів досліджень.

З рис. 3 видно, що значення мінімального кута θ_{\min} незначно збільшується при збільшенні маси вихідного матеріалу, а також збільшується при збільшенні частоти обертання циліндра трієра n . Значення максимального кута θ_{\max} незначно збільшується від маси вихідного матеріалу насіння M_0 , але значно збільшується зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра. З рис. 3 видно, що значення мінімального кута θ_{\min} збільшується зі збільшенням маси вихідного матеріалу насінневої суміші. Збільшення вмісту домішок не впливає на мінімальне θ_{\min} і максимальне θ_{\max} значення кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра. З рис. 3 видно, що зі збільшенням частоти обертання n зростають значення мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра.

Отримані залежності (5) і (6) увійшли до програмного забезпечення системи керування мехатронної системи, яке дозволяє обробляти відеозображення та визначати траєкторію польоту насінин. На основі отриманих даних відбувається налаштування положення лотка для збору насіння в результаті керування сервоприводом. Окрім цього з персонального комп'ютера є можливість керувати електродвигуном через плату керування Arduino UNO і драйвер електродвигуна, а саме встановлювати частоту і напрямок обертання циліндру.

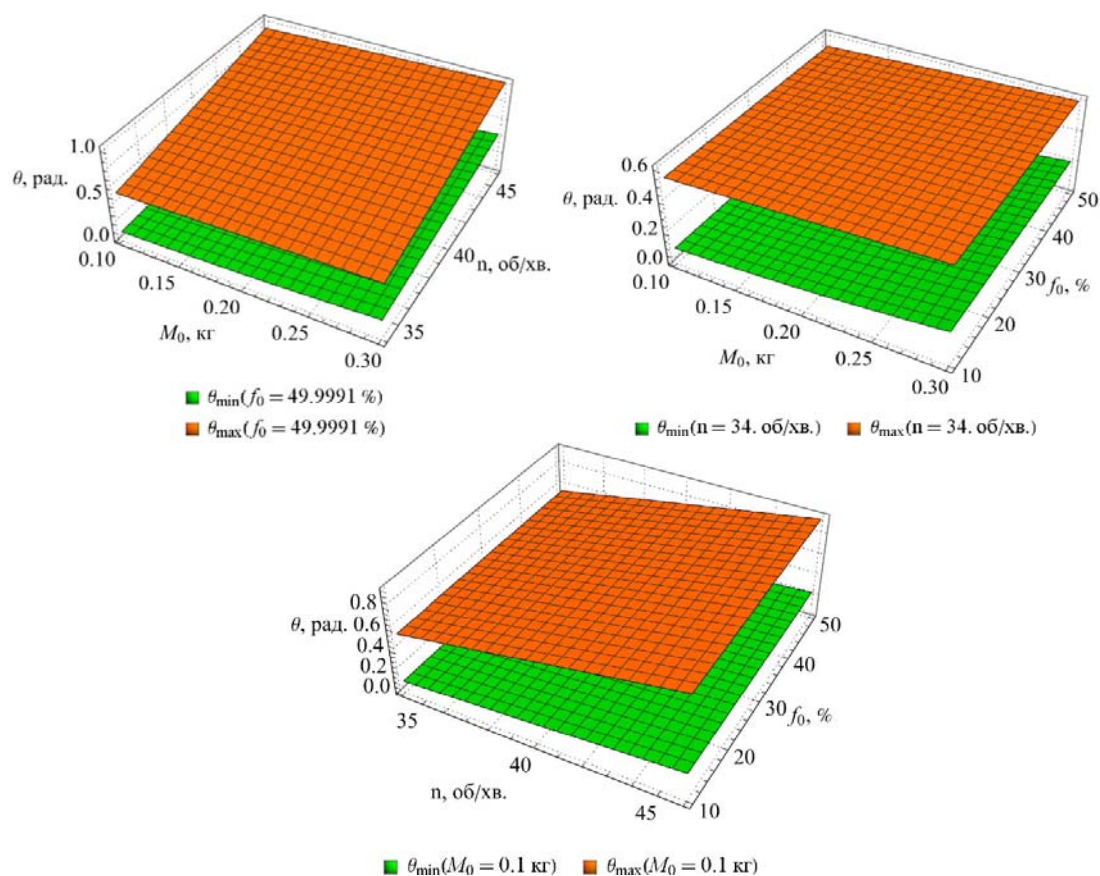


Рисунок 3 – Залежність мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень

Джерело: розроблено авторами

Висновки. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі отримано залежності (5) і (6) значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 ,

частоти обертання циліндра n та вмісту домішок f_0 . Отримані залежності (5) і (6) увійшли до програмного забезпечення системи керування мехатронної системи, яке дозволяє налаштувати положення лотка для збору насіння в результаті керування сервоприводом.

Список літератури

1. Кириченко В. В. Основи управління продукційним процесом польових культур. Харків, 2016. 711 с.
2. Льон олійний, гірчиця. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури / І.А. Шевченко та ін.; Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 44 с.
3. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
4. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ: Держстандарт України, 1993. 74 с.
5. Державна цільова програма розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року *Офіційний вісник України*. № 24. Київ: Кабінет Міністрів України. 2016. 11 с.
6. Алієв Е.Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 2020. 530 с.
7. Jayas D., Cenkowski S. Grain property values and their measurement. *Handbook of Industrial Drying*. / Ed. by Mujumdar A. 2006. P. 575–603.
8. Riahi E., Ramaswamy H. Structure and composition of cereal grains and legumes. *Handbook of Postharvest Technology*. 2003. P. 17–40.
9. Sablani S.S., Ramaswamy H.S. Physical and thermal properties of cereal grains. *Handbook of Postharvest Technology*. 2003. P. 17–40.
10. Öztürk T., Esen B. Physical and mechanical properties of barley. *Agricultura tropica et subtropica*. 2008. 41. P. 117–121.
11. Tavakoli M., Tavakoli H., Rajabipour A., Ahmadi H., Gharib-Zahedi S.M.T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. P. 84–91.
12. Sologubik C., Campañone L., Pagano A., Gely M. Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*. 2013. P. 762–767.
13. Karaj S., Müller J. Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha curcas*. *Industrial Crops and Products*. 2010. P. 129–138.
14. Чурсінов Ю. О., Кудрявцев І. М., Луценко М. В. Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. (2022). № 2 (12). С. 93-99.
15. Naumenko M., Sokol S., Filipenko D., Guridova V., Kharytonov M. Numeric model of the grain mixture flow in a cylindrical sieve which re-rotates around the inclined axis. *IN-MATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56, No. 3. P. 67-74.
16. Heyman J. TracTrac: a massive object tracking algorithm to measure earth surface dynamics. *Computers and Geosciences*. 2019. 128, 11-18, DOI: 10.1016/j.cageo.2019.03.007
17. Heyman J., Boltenhagen P., Delannay R., Valance A. Experimental investigation of high speed granular flows down inclines. *EPJ Web of Conferences*. 2017. 140, 03057, 10.1051/epjconf/201714003057.

Referencis

1. Kyrychenko, V. V. (2016). *Osnovy upravlinnya produktsiynym protsesom pol'ovykh kul'tur [asics of managing the production process of field crops]*. Kharkiv [in Ukrainian].
2. Shevchenko, I. A., Lyakh, V. O., Polyakov, O. I., Soroka, A. I., Vedmedyeva K. V., Zhuravel', V. M., Makhno YU. O., Tovstanovs'ka T. H. & Budilka H. I. (2017). *L'on oliyny, hirschytsya. Stratehiya vyrobnytstva oliynoyi syrovyny v Ukrayini (maloposhyreni kul'tury) [Flax oil, mustard. Strategy for the production of oil raw materials in Ukraine (uncommon crops)]*. Instytut oliynykh kul'tur Natsional'noyi akademiyi ahrarnykh nauk Ukrayiny. Zaporizhzhya: STATUS [in Ukrainian].
3. Aliiev, E. B. (2019). *Fizyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph]*. Zaporizhzhya: STATUS [in Ukrainian].

4. *Nasinnya sil's'kohospodars'kykh kul'tur. Sortovi ta posivni yakosti [Seeds of agricultural crops. Varietal and sowing qualities].* (1993). DSTU 2240-93. Tekhnichni umovy. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
5. *Derzhavna tsil'ova prohrama rozvytku ahrarynoho sektoru ekonomiky na period do 2020 roku [State target program for the development of the agricultural sector of the economy for the period until 2020]* (2016). Ofitsiynyy visnyk Ukrainy. № 24. Kyiv: Kabinet Ministriv Ukrainy [in Ukrainian].
6. Aliiev, E.B. (2020). Mekhaniko-tekhnologichni osnovy protsesu pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku [Mechanical and technological basis of the process of precision separation of sunflower seed material]. *Doctor's thesis*. Zaporizhzhya [in Ukrainian].
7. Jayas, D. & Cenkowski, S. (2006). Grain property values and their measurement. Handbook of Industrial Drying. A. P. Mujumdar(Ed.) . p. 575–603 [in English].
8. Riahi, E. & Ramaswamy, H. (2003). Structure and composition of cereal grains and legumes. Handbook of Postharvest Technology. P. 17–40. [in English].
9. Sablani, S.S. & Ramaswamy, H.S. (2003). Physical and thermal properties of cereal grains. Handbook of Postharvest Technology. P. 17–40 [in English].
10. Öztürk, T. & Esen, B. (2008). Physical and mechanical properties of barley. *Agricultura tropica et subtropica*, 41, p. 117–121 [in German].
11. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H., Gharib-Zahedi, S.M.T. (2009). Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. P. 84–91 [in English].
12. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., Gely, M. (2013). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*. P. 762–767 [in English].
13. Karaj, S., Müller, J. (2010). Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha curcas*. *Industrial Crops and Products*. 2010. P. 129–138[in English].
14. Chursinov, YU. O., Kudryavtsev, I. M. & Lutsenko, M. V. (2022). Rozrobka mobil'noyi ustanovky dlya sortuvannya zernovykh vidkhodiv [Development of a mobile plant for sorting grain waste]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, № 2 (12), 93-99 [in Ukrainian]
15. Naumenko, M., Sokol, S., Filipenko, D., Guridova, V. & Kharytonov, M. (2018). Numeric model of the grain mixture flow in a cylindrical sieve which re-rotates around the inclined axis. *IN-MATEH – Agricultural Engineering*, Vol. 56, No. 3, P. 67-74 [in English].
16. Heyman, J. (2019). TracTrac: a massive object tracking algorithm to measure earth surface dynamics. *Computers and Geosciences*, 128, 11-18, DOI: 10.1016/j.cageo.2019.03.007 [in English].
17. Heyman, J., Boltenhagen, P., Delannay, R. & Valance A. (2017). Experimental investigation of high speed granular flows down inclines. *EPJ Web of Conferences*, 140, 03057, 10.1051/epjconf/201714003057 [in English].

Elchyn Aliiev, Prof., DSc., Senior Researcher

Kristina Lupko, Holder of the third (educational and scientific) level of higher education

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of Experimental Studies of the Selection and Seed Trier

The goal is experimental substantiation of the main parameters and modes of operation of the selection and seed trier of small-seeded crops, development of the work algorithm and software of the corresponding mechatronic system.

For conducting experimental research, a laboratory selection and seed trier was developed and created. To change the rotation frequency of the cylinder and the direction of rotation, the Arduino UNO control board and the L298N DC motor driver were used. The frequency and direction of rotation of the cylinder can be controlled manually using a potentiometer and automatically using the Arduino IDE monitor port. The working body of the trier is a cylinder, which consists of plates with shells. As a result of experimental studies of the process of separation of small-seeded crops on a laboratory cylindrical shell trier, the dependences of the change in the minimum θ_{min} and maximum θ_{max} angles of seed exit from the cylinder shell of the trier on the mass of the seed material M_0 , the rotation frequency of the cylinder n and the content of impurities f_0 were obtained.

The resulting dependencies are fed into the mechatronic control system software, which allows the position of the seed tray to be adjusted as a result of servo control.

seed, impurities, purification, separation, separation, trier, parameters, control, mechatronic system, seed, efficiency

Одержано (Received) 23.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 26.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

В.С. Кошулько, доц., канд. техн. наук, **Ю.О. Чурсінов**, проф., д-р техн. наук,
Н.А. Сова, доц., канд. техн. наук

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: koshulko.v.s@dsau.dp.ua

Результати дослідження процесу віброударної сепарації вівса на кормові цілі

Експериментальними дослідженнями встановлено, що такі важливі параметри процесу як навантаження зерна на сепаруючу поверхню, амплітуда, частота коливань та кут нахилу робочого столу, кінематика його руху та зношування опорних поверхонь значно впливають на ефективність сепарування суміші вівса на лущені та не лущені зерна. Встановлено, що пропускна здатність комірок живильника зменшується по мірі віддалення від завантажувального бункера і розподіл зерна в робочі канали нерівномірні. Вологість зернової сировини та форма вікон живильника впливають на швидкість розподілу зерна по робочим каналам. Ефективність сепарування змінюється в залежності від амплітуди і частоти коливань робочого столу і досягає максимального значення відповідно при 190 мм та 50 – 53 коливання на хвилину. Кут нахилу робочого столу в значній мірі є одним з регульованих параметрів, який впливає на продуктивність і якість процесу сепарування. Найбільш раціональні для ефективності процесу сепарування робочі параметри кута нахилу, які повинні знаходитися в межах 6,5 – 7,5 °.

зерно, корм, годівля, насіння, домішки, очищення, розділення, сепарація, падді-машина, параметри, ефективність

Постановка проблеми. Вівсяна крупа є продуктом харчування і кормом, який має високу цінність завдяки своїм поживним властивостям та приємному смаку. Ячмінь має вищу поживну цінність порівняно з вівсом через більший вміст жиру та менший вміст клітковини. Оболонка вівса містить близько 10 % клітковини, а некондиційний овес може містити до 40% клітковини. Вівсяну кормову суміш часто використовують для годівлі свиноматок та молодняку, а у дорослих птиць можна включати до 30-40% загальної суміші зерно-борошняних кормів у вигляді грубої крупки або цілого зерна. Однак, при годівлі каченят вівсом до 20-денного віку, його необхідно дрібно розмелювати та обмежувати кількість через високий вміст клітковини, яка може призвести до закупорки шлунково-кишкового тракту та загибелі молодняка. Варто відсівати вівсяну муку від оболонок, щоб зменшити вміст клітковини [1].

Тому для підвищення кормової цінності від зернової суміші вівса необхідно відокремлювати оболонки. Однак технологія виробітку вівсяної крупки залишається досить примітивною, що призводить до недостатньої чистоти крупки та ядра низької якості, яке не відповідає стандартам [2].

На сьогоднішній день, найбільш досконалою технологією є використання круповідокремлюючих машин, що дозволяють підвищити продуктивність підприємств і вихід крупки. Однак, якість крупки залишається незмінною, тому необхідне впровадження технологій, спрямованих на поліпшення якості вівсяної крупки [3, 4]. Це актуальне завдання, яке збільшить виробництво крупки, розширить асортимент, підвищить якість та живильну цінність круп'яних виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після аналізування літературних даних та проведення досліджень ефективності виділення ядра на сучасних передових підприємствах встановлено, що операція контролю цільного ядра не є найбільш ефективною порівняно з іншими технологічними операціями, пов'язаними з очищенням зерна та ядра вівса від домішок [5].

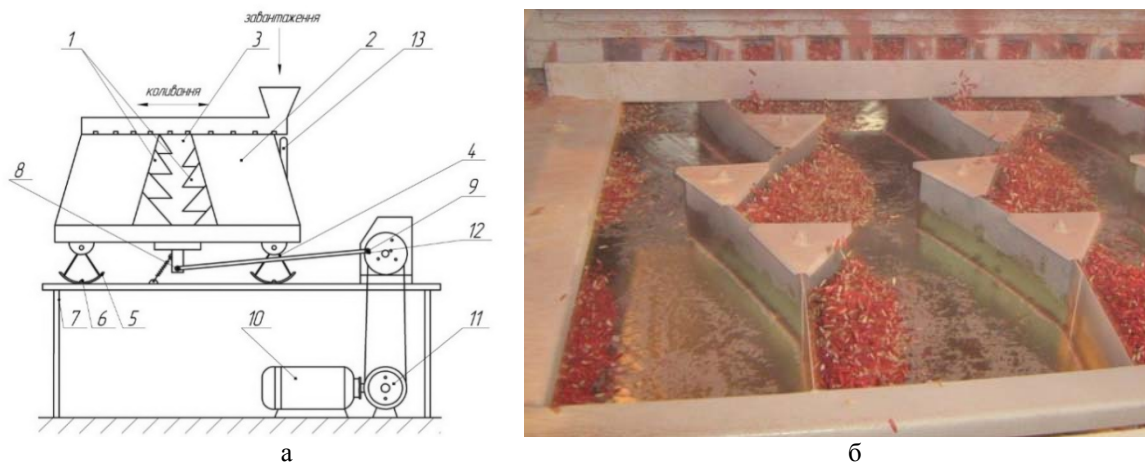
Найбільш ефективним способом відділення домішок зернової суміші вівса є віброфрикційні сепаратори. Процес розділення компонентів насінневих сумішей на фрикційній неперфорованій поверхні полягає в тому, що насіння округле, більш пружне і менш шорсткувате переміщується в низ по фрикційній робочій поверхні, а плоске, менш пружне та більш шорсткувате рухається нагору [6–8].

Одним з типів віброфрикційних сепараторів є падді-машини. Хоча вітчизняні машинобудівні підприємства не випускають падді-машин для промислових крупозаводів, але наукові організації проводять дослідження щодо цього методу сепарування [8-11]. Найбільш сучасні падді-машини випускаються компаніями «Бюлер» (Швейцарія), «Шуле» і ММВ (Німеччина). Круп'яні підприємства в Україні вже багато років використовують падді-машини від ММВ, і вдосконалені моделі цих машин продовжують виробляти і донині. Нещодавно виробництво падді-машин було запущено на Хорольському механічному заводі, де створена машина МСХ-М, що базується на технічних рішеннях машини ТА/1, яку випускає ММВ. Крім того, об'єднання «Маріягромаш» освоїло виробництво падді-машин для підприємств малої потужності. Падді-машини ТА/1 і ТТА/1 від ММВ доступні у варіантах одинарного (ТА/1) та подвійного (ТТА/1) типу. У машині МСХ-М Хорольського механічного заводу основні вузли, привід і органи керування схожі на машину ТА/1 від ММВ.

Однак всі зазначені падді-машини не забезпечують якісної сепарації зернової суміші вівса.

Постановка завдання. Метою є встановлення належних конструктивних та технологічних параметрів для машини віброударної дії з метою розділення продуктів лущення зерна вівса. Це дозволить збільшити виробіток вівсяної крупи високої якості.

Виклад основного матеріалу. Дослідження процесу віброударної сепарації зерна проводилися на експериментальному зразку падді-машини, конструктивно-технологічна схема і загальних вид якої приведено на рис. 1.



1 – похилий стіл, 2 – стінки, 3 – зигзагоподібний канал, 4 – стійка, 5 – сегментно-подібний елемент, 6 – стопорний болт, 7 – станина, 8 – кронштейн, 9 – кривошипно-шатунний механізм, 10 – клинопасова передача, 11 – редуктор, 12 – болт, 13 – пристосування для регулювання амплітуди зворотного поступального руху

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальних вид (б) експериментальному зразку падді-машини

Джерело: розроблено авторами

Для проведення експерименту використовувалась суміш зерен вівса, яка складалась з облущених та нелущених зерен вологістю 12,5–14 %, з вмістом смітних домішок (вівсюга) до 5 % та кількістю пилу, що становила 0,23 % від загальної маси.

Методика експериментальних досліджень передбачала завантаження насіння вівса після лушення в робочий елемент сортувального столу, де проводилась сепарація лушених та нелушених зерен.

Для проведення експерименту було встановлено наступні параметри:

- зміна ступеня подачі сировини на сепарування, тобто продуктивність завантаження робочого каналу сортувального столу (від 0,6 до 1,8 кг/хв.);
- зміна кута нахилу сортувального столу від 2 до 7 градусів;
- зміна частоти коливань сортувального столу від 45 до 55 коливань на хвилину;
- зміна амплітуди коливань сортувального столу від 180 до 220 мм;
- зміна ширини зигзагоподібного каналу від 200 до 220 мм.

Вихідним зразком для порівняння результатів була суміш лушеного зерна вівса з 25 % вмістом нелушеного та вологістю 12 %.

Методика проведення експерименту передбачала оцінку результатів сепарування, що здійснювалась шляхом відбору середньої проби лушених зерен масою 500 грам та методом розбору на розбірній дошці. Якість відокремлених лушених зерен (тобто наявність в них нелушених зерен) та якість не лушених зерен (тобто наявність в них лушених зерен) визначалися тим же способом. Результати фіксувались та обчислювались у відсотковому співвідношенні.

Розроблено спеціальний лоток для визначення продуктивності кожного каналу, в який засипався нижній шар (лушене зерно) на протязі хвилини. Під час експерименту змінювався кут нахилу сортувального столу, який визначався спеціальним кутоміром, а положення сортувального столу фіксувалося болтом та гайкою, зажатим в пазу кутоміра. Частота коливань сортувального столу регулювалась за допомогою редуктора та клинопасової передачі кінематичної схеми приводу. Амплітуда коливань налаштовувалась шляхом зміни довжини тяги кривошипно-шатунного механізму. Ступінь завантаження сировини (продуктивність завантаження) регулювався за допомогою відкривання та закривання щілинного дозатора знизу живильного пристрою. Амплітуда коливань налаштовувалась положенням точки з'єднання шатуна до кривошипно-шатунного механізму. Частота коливань сортувального столу регулювалась за допомогою частотного перетворювача. Відстань між стінками робочого каналу налаштовується шляхом пересування однієї з стінок каналу.

Метою роботи круповідокремлюючої машини є забезпечення збільшення концентрації лушених зерен у першому продукті та зниження концентрації нелушених зерен у другому продукті в порівнянні з початковим матеріалом.

На процес круповідокремлення впливають наступні фактори, а саме частота коливань сортувального столу ω , кут нахилу сортувального столу β , навантаження на канал q , амплітуда коливань сортувального столу A та початкова забрудненість матеріалу ε (табл. 1).

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	Код	Рівні факторів			Інтервал
		-1	0	+1	
Частота коливань сортувального столу ω , хв. ⁻¹	X ₁	45	50	55	5
Кут нахилу сортувального столу β , град	X ₂	2	4,5	7	2,5
Навантаження на канал сортувального столу q , кг/хв.	X ₃	0,6	1,2	1,8	0,6
Амплітуда коливань A , мм	X ₄	140	190	240	50
Початкова чистота вороху ε , %	X ₅	68	74	80	6

Джерело: розроблено авторами

Якщо позначити концентрацію лущених зерен у вихідному продукті K , в першому K_1 , а в другому K_2 то повинно бути $K_1 > K$, а $K_2 < K$. Для оцінки технологічної ефективності необхідно перед усім визначити кількість виділеного ядра в першому продукті за формулою [8]

$$E_{\text{кільк}} = \frac{K_1 A}{K}, \quad (1)$$

де K_1 – концентрація лущених зерен в першому продукті, кг;
 A – кількість першого продукту, кг;
 K – кількість лущеного зерна у вихідному продукті, кг.

Однак в першому продукті можуть бути виділені практично всі лущені зерна, що надійшли до машини, але серед них буде багато нелущених зерен. Це значно знижує технологічну ефективність круповідокремлення. Відповідно, необхідно технологічну ефективність круповідокремлення доповнити якісним показником процесу. Таким показником прийнято відношення фактичного підвищення концентрації лущених зерен в першому продукті, в порівнянні з вихідним, до максимально можливого підвищення концентрації. Якісна ефективність круповідокремлення може бути виражена наступним відношенням

$$E_{\text{якісне}} = \frac{K_1 - K}{1 - K}. \quad (2)$$

Загальна технологічна ефективність може бути представлена як:

$$E_c = E_{\text{кільк}} \cdot E_{\text{якісне}} = \frac{K_1 \cdot A}{K} \cdot \frac{K_1 - K}{1 - K} = \left\| A = \frac{K - K_2}{K_1 - K} \right\| = \frac{K_1(K - K_2)}{K(1 - K)}. \quad (3)$$

Процес віброударної сепарації зерна на експериментальному зразку падді-машини приведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Процес віброударної сепарації зерна на експериментальному зразку падді-машини
Джерело: розроблено авторами

За результатами математичної обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud, отримане рівняння регресії другого порядку для кінцевої чистоти вороху в закодованому вигляді із відхиленими коефіцієнтами регресії за критерієм Стюдента (рис. 3):

$$\varepsilon = 88,81 + 1,09 \cdot X_1 + 1,61 \cdot X_2 - 1,85 \cdot X_3 + 1,02 \cdot X_4 + 2,66 \cdot X_5 + 0,5 \cdot X_1^2 + 0,73 \cdot X_2^2 - 0,2 \cdot X_3^2 + 0,04 \cdot X_4^2 + 0,20 \cdot X_5^2 + 0,29 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,29 \cdot X_1 \cdot X_4. \quad (4)$$

Аналіз отриманого рівняння показує наступне. Вплив кінематично-конструктивних параметрів (X_1, X_2, X_4) на процес чищення близький за величиною, але якщо у X_4 залежність близька до лінійної, то у X_1 та X_4 вона наближається до квадратичної, тобто зміна частоти коливань і кута нахилу столу більш інтенсивно впливає на процес.

Слід відмітити, що одночасне збільшення всіх трьох параметрів в межах аргументованих діапазонів робить залежність більш лінійною.

Початкова забрудненість вороху (X_5) має найбільший вплив на кінцевий результат. Залежність практично лінійна, що дає нам підстави розповсюдити значення цього параметру для чистоти 92 %.

Вплив навантаження на чистоту кінцевого вороха теж носить практично лінійний характер. Але з точки зору економічної ефективності виконаної роботи приймаємо більше значення.

В ході проведення експериментальних досліджень враховувалось, що в експериментальній установці застосовувались елементи конструкції удосконаленого живильника, в якому досягалось рівномірний розподіл вівса перед сепаруванням.

Однак в реальних умовах експерименту виявилось, що у випадку завантаження з бункера в живильник вівса з більшою продуктивністю, відбувається «згущення» або через мірне заповнення живильника сировиною і, таким чином овес не встигає просипатися на робочу поверхню сепарувального столу, відбувається надлишкове заповнення комірок та гальмування крупи шляхом створення в прямокутних вікнах щільних зон.

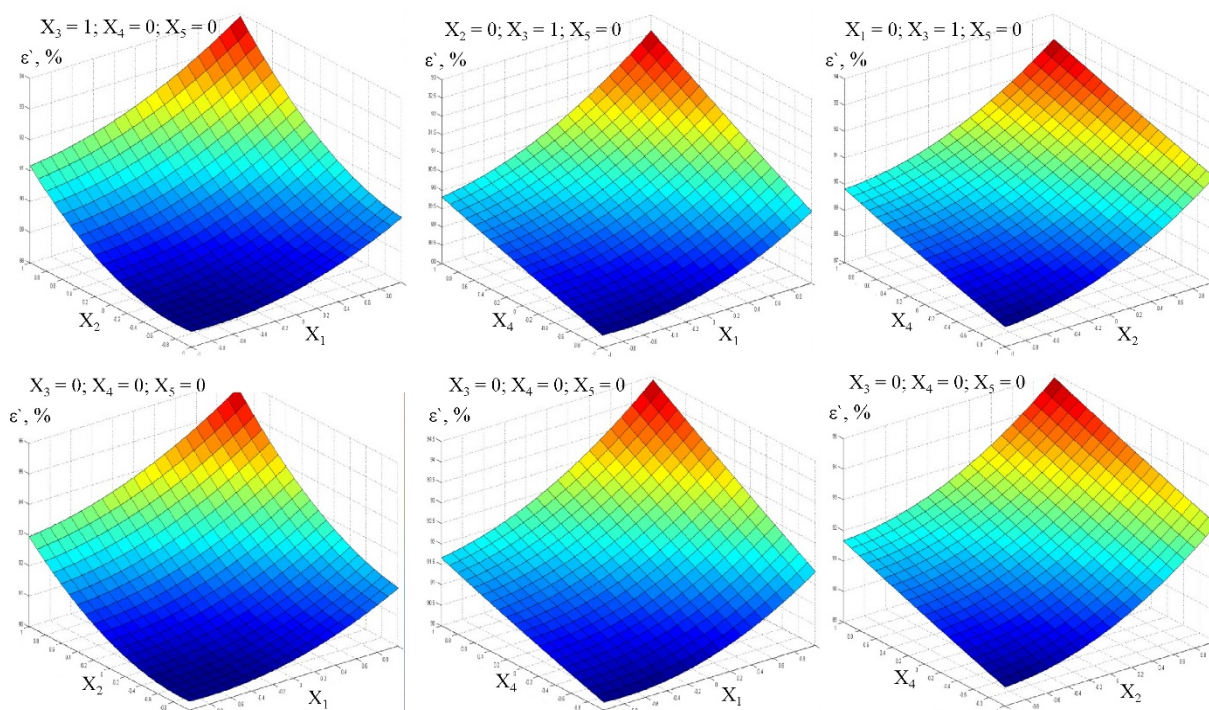


Рисунок 3 – Залежність кінцевої чистоти вороху від факторів досліджень процесу сепарації зерна на експериментальному зразку падді-машини

Джерело: розроблено авторами

Швидкість розшарування суміші з живильника по сепарувальній площині змінюється в залежності від основних параметрів роботи машини: частоти, амплітуди коливань, відстані між робочими зигзагоподібними стінками, продуктивністю та інтенсивністю заповнення живильника сировиною, динамічною зрівноваженістю сепарувального сита, тобто нерівномірністю зворотно-поступальних рухів та в особливості, в кінцевих точках гальмування та розгону.

Результатами досліджень встановлено, що при постійно збільшуваному навантаженні від 0,3 до 2,5 кг/хв завантаження зерен вівса після луцення, зерна спочатку розподіляються в початковій частині комірок від місця завантаження а потім переміщуються на сепаруючу поверхню. Це можна спостерігати з відеограми

спостережень (від центра розподілу сировини з бункера кожна секція робочого сортувального каналу має три вивантажувальних, регульованих по величині спеціальною заслінкою, вікна). При збільшенні продуктивності завантаження постійно збільшується «навантаження» тобто кількість зерна в комірці, на перші комірці та знижується до останньої комірці.

При проведенні експериментальних досліджень визначали вплив амплітуди та частоти коливань сортувального столу на ефективність процесу сепарування.

Дослідження проводилися в діапазоні амплітуд від 140 до 240 мм, а частота коливань від 40 до 60 коливань на хвилину.

Отримані дані показують, що виходячи з графіка (рис. 4) коефіцієнт ефективності сепарування при амплітуді коливань 140 мм має значення 0,68 – 0,69. По мірі збільшення амплітуди підвищується і ефективність сепарування. Найбільше її значення досягається при амплітуді від 180 до 200 мм.

Проаналізований також взаємозв'язок амплітуди та частоти коливань робочого столу на ефективність сепарування. При змінній амплітуді коливань 140 – 180 мм та частоті коливань 40 коливань на хвилину ефективність сепарування невисока, разом тим при збільшенні частоти коливань від 40 до 55 – 60 коливань на хвилину, ефективність сепарування збільшується. В результаті експериментів встановлені найбільш раціональні для процесу сепарування вівса значення величини амплітуди коливань та частоти, при яких процес сепарування зерен стабілізується (рис. 4). Для частоти коливань це відповідає 50 – 55 коливань на хвилину, а для амплітуди більш доцільно використати значення 185 – 195 мм.

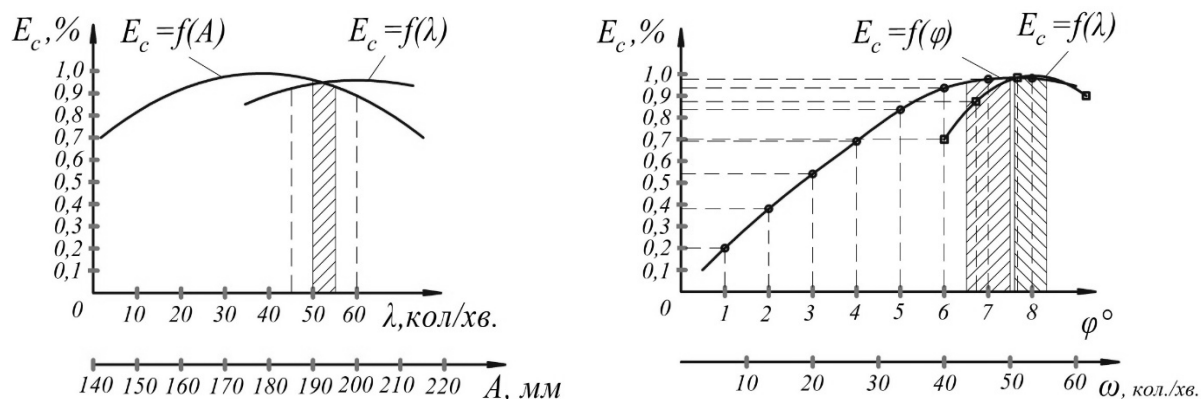


Рисунок 4 – Залежність ефективності сепарування від факторів досліджень процесу сепарації зерна на експериментальному зразку падді-машини

Джерело: розроблено авторами

Для розділення суміші вівса після луцення на луцені та не луцені зерна, тобто на дві фракції, кут встановлення сорбуючої поверхні регулюється спеціальним пристроєм і діапазон регулювань коливається від 0 до 10 °. На елементарну частинку (зернину), як і на весь шар, впливають кут нахилу робочого столу, ширина робочого каналу, кут встановлення робочих зигзагоподібних стінок, амплітуда та частота коливань столу, вологість вихідної сировини що потрапляє на сортувальний стіл, продуктивність його подачі через вікна живильника, динаміка роботи столу. Ці фактори визначають в цілому як буде здійснюватися процес сепарування на вібраційній поверхні робочого каналу. В результаті зворотно-поступальний коливань робочого каналу, зигзагоподібні стінки, в залежності від кута нахилу сепаруючої поверхні по різному відбивають більш легкі за вагою не луцені зерна змінюючи їх швидкість переміщення вверх по похилій поверхні. Луцені зерна, як більш важкі та мають

менший коефіцієнт тертя з загальної суміші переміщуються в нижній шар на робочу поверхню та «сповзають» вниз до вихідного патрубка лущених зерен.

З графіка (рис. 4) видно (крива $E_c=f(\varphi)$), що при горизонтальному розташуванні сортувальної поверхні робочого столу ефективність сепарування близька коефіцієнту 0,1, тобто практично спостерігається невисока продуктивність і незначна ефективність розділення лущених та не лущених зерен. Зі збільшенням кута нахилу швидкість сепарування збільшується, що підвищує продуктивність та поліпшує ефективність сепарування, максимальне значення якої досягається при куті нахилу робочої сепарувальної поверхні в $6,5-7,5^\circ$ (заштриховано на графіку).

При розгляді взаємозв'язку кута нахилу робочого столу та частоти коливань на ефективність сепарування виявлено, що при незначних кутах нахилу від 0 до $1,5^\circ$ та коливаннях стола від 10 до 40 коливань на хвилину, ефективність сепарування незначна та не перевищує коефіцієнт $0,3 - 0,35$. Збільшення частоти коливань до $50 - 55$ коливань на хвилину при збільшенні кута нахилу, сприяють більшій продуктивності та кращій якості розділення суміші на лущені та нелущені зерна вівса.

Як видно з графіка (рис. 4) найбільш вагомими для раціональних режимів роботи та високої ефективності розділення суміші можна рахувати кут нахилу робочого столу $6,5 - 7,5^\circ$, а частоту коливань $52 - 55$ коливань на хвилину.

Висновки. Експериментальними дослідженнями встановлено, що такі важливі параметри процесу як навантаження зерна на сепаруючу поверхню, амплітуда, частота коливань та кут нахилу робочого столу, кінематика його руху та зношування опорних поверхонь значно впливають на ефективність сепарування суміші вівса на лущені та нелущені зерна.

Встановлено, що пропускна здатність комірок живильника зменшується по мірі віддалення від завантажувального бункера і розподіл зерна в робочі канали нерівномірні. Вологість зернової сировини та форма вікон живильника впливають на швидкість розподілу зерна по робочим каналам.

Ефективність сепарування змінюється в залежності від амплітуди і частоти коливань робочого столу і досягає максимального значення відповідно при 190 мм та $50 - 53$ коливання на хвилину.

Кут нахилу робочого столу в значній мірі є одним з регульованих параметрів, який впливає на продуктивність і якість процесу сепарування. Найбільш раціональні для ефективності процесу сепарування робочі параметри кута нахилу, які повинні знаходитися в межах $6,5 - 7,5^\circ$.

Список літератури

1. Ляшенко Н. О. Економічна ефективність виробництва зерна вівса в Україні. *Таврійський науковий вісник*. 2015. № 90. С. 254-260.
2. Кустов І. О., Кузьменко Ю. Я., Чернишова О. О. Особливості очищення та переробки зерна голозерного вівса. *Science, Research, Development*. 26: Technics and Technology: monografia rosoconferencyjna. Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Poznan – Warszawa. 2020. P. 22–25.
3. Соц С.М., Жигунов Д.О., Кустов І.О. Показники якості голозерного вівса. *Зернові продукти і комбікорми*. 2013. № 1 (49). С. 10-13.
4. Буранова С.В., Дмитренко Л.Д., Євдокимова Г.Й., Урвачов О.В. Обґрунтування раціональної схеми очищення зерна голозерного вівса. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*. 2009. Вип. 36, т. 1. С. 76-79.
5. Абдуєв М. М., Манчинський Ю. О. Теоретичне визначення доцільної області параметрів повітряного горохоочисника. *Механізація сільськогосподарського виробництва: зб. наук. праць НАУ*. Київ: НАУ. 2000. Т. VII. С. 127–132.
6. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF*. 2019. 50. P. 12-22.

7. Shevchenko I., Aliiev E., Viselga G., Kaminski J. R. (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators. *Mechanika*, 27(4), 311–320. doi: 10.5755/j02.mech.27647
8. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
9. Козаченко О.В., Алієв Е.Б., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Крекот М.М. Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насінневого матеріалу гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 2021. 31. С. 142-151. DOI: doi: 10.36710/ioc-2021-31-13.
10. Адаптивний вібропневматичний сепаратор: пат. 122809 Україна: МПК (2006), B03B 4/02 (2006.01), B07B 4/00, B07B 13/18 (2006.01) ; заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № а201807029; заявл. 22.06.2018; опубл. 06.01.2021, бюл. № 1.
11. Круповідокремлююча машина (падді-машина): пат. 70722 Україна: МПК (2012.01) B07B 1/00, № u201113888; заявл. 25.11.2011; опубл. 25.06.2012, бюл. № 12.

Referencis

1. Lyashenko, N. O. (2015). Ekonomichna efektyvnist' vyrobnytstva zerna vivsa v Ukrayini [Economic efficiency of oat grain production in Ukraine]. *Tavrijs'kyj naukovyj visnyk – Taurian scientific bulletin*, No. 90. P. 254-260 [in Ukrainian].
2. Kustov, I. O., Kuzmenko, Yu. Ya. & Chernyshova, O. O. (2020). *Osoblyvosti ochyshchennya ta pererobky zerna holozernoho vivsa [Peculiarities of cleaning and processing of whole grain oat grain]*. Science, Research, Development. 26: Technics and Technology: monografia poconferencejna. Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Poznan – Warszawa [in Ukrainian].
3. Sots, S.M., Zhigunov, D.O. & Kustov, I.O. (2013). Pokaznyky yakosti holozernoho vivsa [Indicators of quality of bare oats]. *Zernovi produkty i kombikormy – Cereal Products and Compound Feed*, 1 (49), 10-13 [in Ukrainian].
4. Buranova, S.V., Dmytrenko, L.D., Yevdokymova, G.Y. & Urvachev, O.V. (2009). Obgruntuvannya ratsional'noyi skhemy ochyshchennya zerna holozernoho vivsa [Justification of the rational scheme of grain cleaning of bare oats]. *Naukovi pratsi Odes'koi natsional'noi akademii kharchovykh tekhnolohij – Scientific works of the Odessa National Academy of Food Technologies*, Issue 36, vol. 1, 76-79 [in Ukrainian].
5. Abduev, M. M. & Manchinsky, Yu. O. (2000). Teoretychne vyznachennya dotsil'noyi oblasti parametriv povitryanoho horokhoochysnyka [Theoretical determination of the appropriate range of air pea cleaner parameters]. *Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva: zb. nauk. prats' NAU – Mechanization of agricultural production: Coll. of science works of NAU*, Vol. VII, 127–132 [in Ukrainian].
6. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A. & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF*, 50, P. 12-22 [in English].
7. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G. & Kaminski, J. R. (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators. *Mechanika*, 27(4), 311–320. doi: 10.5755/j02.mech.27647 [in English].
8. Aliiev, E. B. (2019). *Fyzyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku. [Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material]*. Zaporizhzhia: STATUS [in Ukrainian].
9. Kozachenko, O.V., Aliev, E.B., Bakum, M.V., Mykhaylov, A.D. & Krekot, M.M. (2021). Obgruntuvannya efektyvnosti vykorystannya vibrofraktsiynoho sепаратора pry pidhotovtsi nasinnyevoho materialu hirchytsti [Justification of the effectiveness of using a vibro-friction separator in the preparation of mustard seed material]. *Naukovo-tekhnichnyj biuletyn' Instytutu olijnykh kul'tur NAAN – Scientific and technical bulletin of the Institute of Oil Crops of the National Academy of Sciences*, 31, 142-151. DOI: doi: 10.36710/ioc-2021-31-13 [in Ukrainian].
10. Shevchenko, I. A. & Aliyev, E. B. (2021). Patent of Ukraine for the invention 122809, IPC (2006), B03B 4/02 (2006.01), B07B 4/00, B07B 13/18 (2006.01). *Adaptyvnyy vibropnevmatychnyy separator [Adaptive vibropneumatic separator]*. Applicant: Institute of Oil Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, No. a201807029. Application 06/22/2018. Publ. 06.01.2021, Bull. No. 1. [in Ukrainian].
11. Koshulko, V. S., Naumenko, M. M., Chursinov, Y. O. & Mishchenko, M. I. (2012). Patent of Ukraine for the invention 70722, IPC (2012.01) B07B 1/00. *Krupovidokremlyuyucha mashyna (paddi-mashyna) [Grain-separating machine (paddy machine)]*. Applicant: V. S. Koshulko, M. M. Naumenko, Yu. O. Chursinov, M. I. Mishchenko, No. u201113888. Application 25.11.2011. Publ. 25.06.2012, Bull. No. 12. [in Ukrainian].

Vitaliy Koshul'ko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yuriy Chursinov**, Prof., DSc., **Natalia Sova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of the Study of the Process of Vibro-Impact Separation of Oats for Fodder

Purposes

The goal is to establish the proper structural and technological parameters for the vibration impact machine for the purpose of separating products of oat grain husking. This will increase the production of high-quality oat groats.

The goal is to establish the proper structural and technological parameters for the vibration impact machine for the purpose of separating products of oat grain husking. This will increase the production of high-quality oat groats. Experimental studies have established that such important process parameters as the grain load on the separating surface, the amplitude, frequency of oscillations and the angle of inclination of the work table, the kinematics of its movement and the wear of the support surfaces significantly affect the efficiency of separating the oat mixture into hulled and unhulled grains. It was established that the throughput of the feeder cells decreases with distance from the loading hopper and the distribution of grain in the working channels is uneven. The moisture content of grain raw materials and the shape of the feeder windows affect the speed of grain distribution along the working channels. The separation efficiency varies depending on the amplitude and frequency of the desktop vibrations and reaches its maximum value, respectively, at 190 mm and 50-53 vibrations per minute. The angle of inclination of the working table is to a large extent one of the adjustable parameters that affects the productivity and quality of the separation process.

The working parameters of the tilt angle, which should be in the range of 6.5-7.5 °, are the most rational for the efficiency of the separation process.

grain, fodder, feeding, seeds, impurities, cleaning, separation, separation, paddy machine, parameters, efficiency

Одержано (Received) 23.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 26.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 631.362

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.83-90](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90)

О. В. Козаченко, проф., д-р техн. наук, **М. В. Бакум**, доц., канд. техн. наук,
А. Д. Михайлов, доц., канд. техн. наук, **М. М. Кречот**, доц., канд. техн. наук,
О. С. Чала, доц., канд. с.-г. наук, **О.І. Завгородній**, проф., д-р техн. наук

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: o.v.kozachenko21@gmail.com

Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині

Мета роботи є дослідження можливості підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного за рахунок його сепарації на вібраційній насіннеочисній машині з неперфорованими фрикційними робочими площинами. У статті наведені результати доочищення і сортування насінневої суміші сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині після її попередньої сепарації на існуючих зерноочисних машинах. За один пропуск некондиційної насінневої суміші сафлору красильного через вібраційну насіннеочисну машину отримано 91,94 % (від маси вихідного матеріалу) насіння основної культури з високими посівними показниками, яке відповідає вимогам державного стандарту України. Посів таким насінням дає можливість зменшити його норму висіву та підвищити врожайність сафлору красильного.

сепарація, розділення, очищення, вібраційна насіннеочисна машина, параметри, насіння, властивості, якість, сафлор красильний

© О. В. Козаченко, М. В. Бакум, А. Д. Михайлов, М. М. Кречот, О. С. Чала, О.І. Завгородній, 2023

Постановка проблеми. Сафлор більше всього відомий як фарбувальна рослина, з квіток якої виробляють фарбу. Але насіння сафлору містить 15,0-37,0 %, а за деякими даними до 60,0 %, напіввисихаючої олії (до цього типу також відносять соняшникову і соєву олії) [1].

У теперішній час сафлорову олію використовують в косметології, дитячому харчуванні, для виготовлення маргарину, оліфи, лінолеуму, вошанки. Сафлор також використовується як кормова культура [2].

Суттєвий чинник, який впливає на врожайність сільськогосподарських культур, у тому числі сафлору красильного, є насіння з високими посівними властивостями [3].

Отримання висококондиційного насіння сафлору красильного на існуючих традиційних зерноочисних і сепаруючих машинах не завжди вдається. Тому поставленою проблемою є удосконалення цих машин для виконання сепарації насінневої суміші сафлору, шляхом обґрунтування їх конструктивно-режимних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання універсальних насіннеочисних машин з повітряно-решітно-трієрними робочими органами для відокремлення насінневого матеріалу сафлору красильного не завжди призводить до отримання насіння, що відповідає стандартам. Ці машини майже не здатні відокремити важковідокремлюване насіння бур'янів та домішок на робочих органах. Використання спеціальних насіннеочисних машин для сепарації насіння сафлору красильного призводить до травмування та додаткових втрат насіння основної культури [4, 5].

Правильна та своєчасна післязбиральна обробка зібраного насіння дозволяє відокремити насіння бур'янів, насіння інших культурних рослин та домішки від насіння основної культури. Це сприяє отриманню високоякісного насінневого матеріалу, що має великий вплив на норму висіву насіння та врожайність.

При розробці технологій очищення та сортування насінневої суміші, включаючи сафлор, враховуються наявність та вибір відповідного обладнання, яке забезпечує найбільшу ефективність сепарації залежно від кількості та складу насіння бур'янів та домішок, фізико-механічних властивостей компонентів насінневої суміші, вологості та інших факторів [6, 7].

Використовують різні способи сепарації насіння сафлору. При попередньому очищенні насіння видаляють з насінневого матеріалу найбільші домішки. Первинне очищення проводять якщо насінневий матеріал має вміст насіння бур'янів та домішок близько 8,0 % і вологість не більше 18,0 %. Вихідний насінневий матеріал розділяють на три фракції: основне насіння, крупні фуражні відходи, легкі і дрібні домішки. Вторинне очищення здійснюють коли насінневий матеріал має вміст насіння бур'янів - 3,0 %, домішок до 8,0 %, вологість до 18,0 %. Під час цього процесу вихідний матеріал розподіляється на чотири групи: основне насіння, фракція фуражу та легких відходів, великі домішки та дрібні домішки. Крім того, можуть застосовуватись спеціальні насіннеочисні машини для окремого відокремлення важковідокремлюваного насіння бур'янів та домішок [6, 8].

Тому, для досягнення якісного насіння, необхідно, щоб у господарстві була належно підготовлена матеріально-технічна база для післязбиральної обробки насіння.

Варто відзначити, що існує проблема з обладнанням, яке використовується для сепарування насіння сільськогосподарських культур, включаючи сафлор, оскільки воно не завжди забезпечує отримання насіння, що відповідає державному стандарту.

На сьогоднішній день все більш поширене застосування вібраційних насіннеочисних машин для післязбиральної обробки насіння сафлору красильного, які

розділяють компоненти насінневої суміші на основі фізико-механічних властивостей, таких як фрикційні властивості, пружність і форма насіння [10–12].

У зв'язку з цим, дослідження, розробка та впровадження інноваційних методів сепарації, сучасних насіннеочисних машин та іншого обладнання для очищення та сортування насіння сафлору красильного має велике значення і є актуальною задачею.

Постановка завдання. Метою є дослідження можливості підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного за рахунок його сепарації на вібраційній насіннеочисній машині з неперфорованими фрикційними робочими площинами.

Виклад основного матеріалу. Вихідна насіннева суміш сафлору красильного після сепарації на існуючих насіннеочисних машинах загального та спеціального призначення мала наступні посівні показники: вміст: насіння основної культури – $99,13 \pm 0,05$ %, обрешене насіння сафлору – $0,14 \pm 0,05$ %, оболонки насіння – $0,29 \pm 0,05$ %, насіння інших культур – $0,19 \pm 0,05$ %, незернові домішки – $0,25 \pm 0,05$ %, схожість – $78,0 \pm 0,2$ %, енергія проростання – $71,0 \pm 0,2$ %, маса 1000 насінин – $42,82 \pm 0,4$ г.

Насіння за вмістом насіння основної культури було кондиційним, але за схожістю воно не відповідало вимогам державного стандарту ДСТУ 2240-93 [13].

Для забезпечення можливості виділення обрешеного насіння, оболонок, насіння інших культур та незернових домішок з насіння сафлору красильного, а також з метою збільшення подібності, енергії проростання та маси 1000 насінин, були проведені лабораторні експериментальні дослідження з використанням вібраційної насіннеочисної машини, зображеної на рисунку 1 [10-11].

Параметри роботи машини були наступні: амплітуда коливань робочого органу – 1,1 мм; частота коливань - $185,0 \text{ с}^{-1}$; поздовжній кут нахилу робочого органу – $4,3^\circ$; поперечний кут нахилу – $2,1^\circ$; кут спрямованості коливань – $29,0^\circ$. Подача матеріалу на кожну робочу поверхню становила 11,2 кг/год.

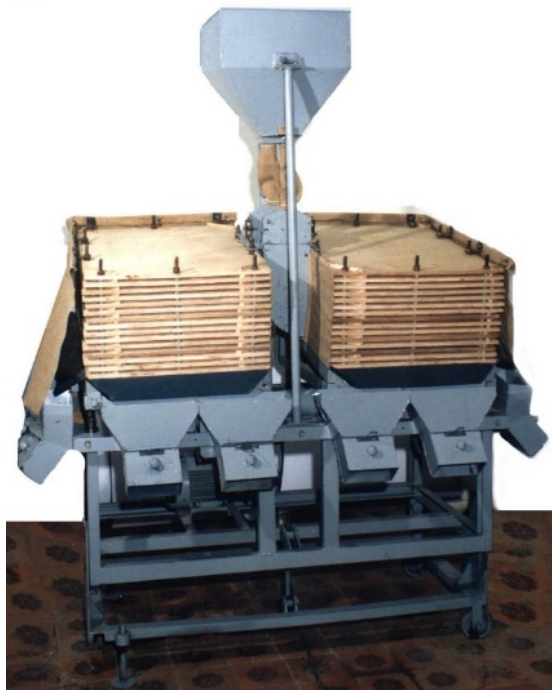


Рисунок 1 – Загальний вид експериментальному зразку віброфрикційного сепаратора
Джерело: розроблено авторами

У процесі сепарації насіння сафлору на вібраційній насіннеочисній машині, робочі поверхні були покриті брезентом.

В процесі обробки на машині, вихідний насінневий матеріал був розділений на сім фракцій. Для кожної фракції та вихідного насіння були визначені посівні якості, такі як вміст насіння основної культури, подібність, енергія проростання та маса 1000 насінин.

У таблиці 1 наведені результати післяочищення та сортування насіння сафлору красильного на вібраційній насіннеочисній машині.

Таблиця 1 – Результати відділення насіння сафлору красильного за допомогою вібраційної насіннеочисної машини.

Найменування показників	Вихідна суміш	Номер фракції (приймальника)						
		1	2	3	4	5	6	7
Розподілення насінневої суміші по фракціях, %	100,00	0,27	1,10	90,57	5,69	0,61	0,95	0,81
Розподілення насінневої суміші зростаючим підсумком, %	100,00	0,27	1,37	91,94	97,63	98,24	99,19	100,00
Вміст насіння сафлору, %	99,13	100,00	99,26	99,51	99,44	96,41	90,53	66,61
Вміст обрушеного насіння сафлору, %	0,14	-	0,74	0,10	0,16	0,38	0,54	2,84
Вміст оболонки насіння, %	0,29	-	-	0,28	0,22	0,52	1,21	1,62
Вміст насіння інших культур, %	0,19	-	-	0,11	0,18	2,69	3,18	3,82
Вміст незернових домішок, %	0,25	-	-	-	-	-	4,54	25,11
Маса 1000 насінин, г	42,82	41,12	44,14	43,43	37,56	37,18	31,86	31,27
Схожість, %	78,0	93,0	82,0	81,0	45,0	24,0	19,0	14,0
Енергія проростання, %	71,0	81,0	76,0	74,0	40,0	21,0	16,0	11,0
Якість насіння	Н	К	К	К	Н	Н	Н	Н

* Н – не кондиційне; К – кондиційне

Джерело: розроблено авторами

В результаті проведених експериментальних лабораторних досліджень на вібраційній насіннеочисній машині були отримані наступні висновки (таблиця 1): у першому приймальнику, який складає 0,27 % від маси вихідного матеріалу, було знайдено насіння сафлору з вмістом насіння на рівні 100,0 %. У цей приймальник не потрапило обрушене насіння сафлору, оболонки насіння, насіння інших культур та незернові домішки.

Порівняно з вихідним насінням, насіння, яке потрапило до першого приймальника, показало значне покращення у схожості та енергії проростання, збільшившись відповідно на 15,0 % та 10,0 %. Маса 1000 насінин також зменшилась на 1,70 грама. Це пояснюється тим, що у цей приймальник потрапило більш округле та менше за розміром насіння сафлору.

Показники посівної якості насіння сафлору першого приймальника відповідають встановленим стандартам якості та вважаються придатними для використання.

При проходженні насінневого матеріалу через другий приймальник (що становить 1,10% від маси початкової суміші), було виявлено насіння сафлору

красильного, яке містить на 0,13% більше насіння основної культури, ніж вихідне насіння. До цього приймального потрапило лише 0,74% обрушеного насіння сафлору.

Порівняно з вихідним насінням, насіння, яке потрапило до другого приймального, також відзначається вищою схожістю, енергією проростання та масою 1000 насінин. Відповідно, ці показники перевищують вихідне насіння на 4,0%, 5,0% та 1,32 грама.

Третій приймальник має найбільшу виходу насінневого матеріалу сафлору красильного і становить 90,57 % від маси початкової суміші. Вміст насіння основної культури в цьому приймальнику перевищує вихідне насіння на 0,38%. У цей приймальник потрапило 0,10 % обрушеного насіння сафлору, 0,28% оболонки насіння та 0,11% насіння інших культур. Незернові домішки не були знайдені в цьому приймальнику.

Схожість та енергія проростання насіння цього приймального перевищують вихідні показники на 3,0 %. В порівнянні з вихідним матеріалом, маса 1000 насінин сафлору красильного зросла на 0,61 грама.

Насіння, що потрапило до цього приймального, відповідає вимогам для використання як посівний матеріал і є кондиційним.

Вміст насіння основної культури у четвертому приймальнику (який становить 5,69 % від маси початкового матеріалу) збільшився на 0,31 % порівняно з вихідним насінням. До цього приймального потрапило 0,16 % обрушеного насіння сафлору, 0,22 % оболонки насіння та 0,18 % насіння інших культур. В незернові домішки не потрапило.

У порівнянні з показниками вихідного насіння, схожість, енергія проростання та маса 1000 насінин суттєво зменшилися на 33,0 %, 31,0 % та 5,26 грама відповідно.

Вміст насіння основної культури цього приймального складає 94,54 % і відповідає вимогам для використання як посівний матеріал, але за схожістю 45,0 % вважається некондиційним.

П'ятий приймальник отримав суміш насіння сафлору красильного, яка має менші значення вмісту насіння основної культури, схожості, енергії проростання та маси 1000 насінин порівняно з вихідним насінням на 2,72 %, 54,0 %, 50,0 % та 5,64 грами відповідно (вихід приймального становить 0,61 % від маси початкового матеріалу).

На основі посівних показників, насіння сафлору цього приймального вважається некондиційним.

Шостий приймальник отримав насінневий матеріал сафлору, до якого потрапило 0,95 % некондиційного насіння. Вміст насіння основної культури, схожість, енергія проростання та маса 1000 насінин сафлору красильного зменшилися на 8,60 %, 59,0 %, 55,0 % та 10,96 грама відповідно порівняно з вихідним насінням.

У сьомий приймальник потрапило 0,54 % обрушеного насіння сафлору красильного, 1,22 % оболонки насіння, 3,18 % насіння інших культур та 4,54 % незернових домішок.

За посівними показниками насіння цього приймального також вважається некондиційним і не відповідає вимогам до посівного матеріалу.

Варто відмітити, що у восьмий приймальник (вихід приймального становить 0,81 % від маси початкового матеріалу) надійшло 2,84 % обрушеного насіння сафлору, 1,62 % оболонки насіння, 3,82 % насіння інших культур та 25,11 % незернових домішок.

Схожість, енергія проростання та маса 1000 насінин цього приймального менші, відповідно, на 64,0 %, 60,0 % та 11,55 грамів порівняно з вихідним насінням.

За вмістом насіння основної культури, схожістю та іншими показниками насіння восьмого приймального не відповідає вимогам до посівного матеріалу.

Висновки. На вібраційній насіннеочисній машині з фрикційним неперфорованим робочим органом під час одного проходу можна відокремити наступні складові з насіння сафлору красильного: обрушене насіння основної культури, оболонки насіння, насіння інших культур та незернові домішки.

Разом з відсіяним обрушеним насінням сафлору, оболонками насіння, насінням інших культур та незерновими домішками також видаляється неповноцінне насіння основної культури, яке може бути травмоване, недорозвинене або має інші дефекти. Тому існує можливість покращити важливі посівні показники насіння, такі як схожість, енергія проростання та маса 1000 насінин.

Вихід кондиційного насіння складає 91,94 % від маси початкового матеріалу.

Використання вібраційної насіннеочисної машини для сепарації насіння сафлору красильного та виділення повноцінного насінневого матеріалу для посіву є ефективним засобом покращення основних посівних якостей цього насіння і сприяє збільшенню врожайності цієї культури.

Результати експериментальних досліджень свідчать про доцільність використання вібраційної насіннеочисної машини з неперфорованими робочими площинами для доочищення насінневих сумішей сафлору красильного, що включає одночасне сортування насіння основної культури.

Рекомендується включати цю машину до складу технологічних ліній для післязбиральної обробки насінневих сумішей сафлору красильного.

Список літератури

1. Шевченко І. А., Поляков О. І., Ведмедева К. В., Комарова І. Б. Рижій, сафлор, кунжут. Стратегія виробництва олійної сировини в Україні (малопоширені культури). Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Запоріжжя: СТАТУС, 2017. 40 с.
2. Сафлор: монографія. / К В. Ведмедева та ін. Київ: Аграрна наука, 2022. 160 с.
3. Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами. Навчальний посібник. ЦНТУ, 2022. 220 с.
4. Завгородній О.І., Обихвіст О.В. Періодичний рух частинок в процесі вібросепарації з упродовженням зміни напрямку коливальних деки. *Науковий вісник НАУ*. 2005. № 92, Ч.1. С.228-238.
5. Войтюк Д. Г., Аніскевич Л. В., Іщенко В. В. Сільськогосподарські машини: підручник / за ред. Д.Г. Войтюка. К.: Агроосвіта, 2015. 679 с.
6. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
7. Алієв Е. Б. Автоматичне фенотипування насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Київ: Аграрна наука, 2022. 104 с.
8. Shevchenko I., Aliiev E. Precise grading and sorting of sunflower plant materials in industrial facilities. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. 23(2). P. 327-341. DOI: /10.5513/JCEA01/23.2.3345.
9. Aliiev E., Lupko K. Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. *Scientific Horizons*. 2021. 24(3), P. 75-86. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.75-86.
10. Заика П. М., Мазнев Г. Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. М.: Колос, 1978. 287 с.
11. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Т. 3, розд. 7. Очистка і сортування насіння. Харків. Око, 2006. 407 с.
12. Козаченко О.В., Алієв Е.Б., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Кречот М.М. Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насінневого матеріалу гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2021. 31. С. 142-151. DOI: 10.36710/ioc-2021-31-13.
13. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ: Держстандарт України, 1993. 74 с.

Referencis

1. Shevchenko, I.A., Polyakov, O.I., Vedmedyeva, K.V. & Komarova I.B. (2017). *Ryzhiy, saflor, kunzhut. Stratehiya vyrobnytstva oliynoyi syrovyny v Ukrayini (maloposhyreni kul'tury) [Ryzhiy, safflower, sesame. Strategy for the production of oil raw materials in Ukraine (uncommon crops)]*. Instytut oliynykh kul'tur Natsional'noyi akademiyi ahrarykh nauk Ukrayiny. Zaporizhziya: STATUS [in Ukrainian].
2. Vedmedyeva, K.V., Polyakov, O.I., Leus, T.V., Aliyeva, O.YU. & Nikitenko, O.V. (2022). *Saflor: monohrafiya [Safflower: monograph]*. Kyiv: Aharna nauka [in Ukrainian].
3. Salo, V., Leshchenko, S., Luzan, P. & Salo, L. (2022). *Mashyny dlya sivby, sadinnya ta dohlyadu za posivamy [Machines for sowing, planting and caring for crops]*. Navchal'nyy posibnyk. TSNTU [in Ukrainian].
4. Drincha, V.M. (2006). *Issledovaniye separatsii semyan i razrabotka mashinnykh tekhnologiy ikh podgotovki [Research of seed separation and development of machine technologies for their preparation]*. Voronezh: Izdatel'stvo NPO «MODEK» [in Russian].
5. Voytyuk, D.H., Aniskevych, L.V. & Ishchenko, V.V. (2015). *Sil's'kohospodars'ki mashyny: pidruchnyk [Agricultural machines: a textbook]*. D.H. Voytyuka (Eds.). Kyiv: Ahrosvita [in Ukrainian].
6. Aliiev, E. B. (2019). *Fizyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph]*. Zaporizhziya: STATUS [in Ukrainian].
7. Aliiev, E.B. (2022). *Avtomatychne fenotypuvannya nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [Automatic phenotyping of sunflower seed material: monograph]*. Kyiv: Aharna nauka [in Ukrainian].
8. Shevchenko, I. & Aliiev, E. (2022). Precise grading and sorting of sunflower plant materials in industrial facilities. *Journal of Central European Agriculture*, 23(2), p. 327-341. DOI: /10.5513/JCEA01/23.2.3345.
9. Aliiev, E. & Lupko, K. (2021). Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. *Scientific Horizons*, 24(3), P. 75-86. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.75-86.
10. Zaika, P.M. & Maznev, G.Ye. (1978). *Separatsiya semyan po kompleksu fiziko-mekhanicheskikh svoystv [Separation of seeds according to the complex of physical and mechanical properties]*. M.: Kolos [in Russian].
11. Zayika, P.M. (2006). *Teoriya sil's'kohospodars'kykh mashyn. Tom 3, rozdil 7. Ochystka i sortuvannya nasinnya [Theory of agricultural machines. Vol. 3, ch. 7. Seed cleaning and sorting]*. Kharkiv. Oko [in Ukrainian].
12. Kozachenko, O.V., Aliyev, E.B., Bakum, M.V., Mykhaylov, A.D. & Krekot, M.M. (2021). Obgruntuvannya efektyvnosti vykorystannya vibrofryktsiyynoho separatora pry pidhotovtsi nasinnyevoho materialu hirchytisi [Justification of the effectiveness of using a vibro-friction separator in the preparation of mustard seed material]. *Naukovo-tekhnichnyy byuletyn' Instytutu oliynykh kul'tur NAAN*, 31, 142-151. DOI: 10.36710/ioc-2021-31-13 [in Ukrainian].
13. *Nasinnya sil's'kohospodars'kykh kul'tur. Sortovi ta posivni yakosti. Tekhnichni umovy [Seeds of agricultural crops. Varietal and sowing qualities. Specifications]*. (1993). DSTU 2240-93. Kyiv: Derzhstandart Ukrayiny [in Ukrainian].

Oleksiy Kozachenko, Prof., DSc., **Mykola Bakum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatoly Mykhailov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Krakot**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olga Chala**, Assoc. Prof., PhD agricul. sci., **Oleksiy Zavorodniy**, Prof., DSc.

State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine

Improving the Sowing Properties of Safflower Dye Seeds Using a Vibrating Seed Cleaning Machine

The purpose of the work is to study the possibility of improving the sowing properties of safflower seeds due to their separation on a vibrating seed cleaning machine with non-perforated friction working surfaces.

The article presents the results of cleaning and sorting of the seed mixture of dyed safflower on a vibrating seed cleaning machine after preliminary separation on existing grain cleaning machines. For one pass of the non-standard safflower seed mixture through a vibrating seed cleaning machine, 91.94% (from the mass of the starting material) of the main crop seeds with high sowing rates, which meets the requirements of the state standard of Ukraine, was obtained. The separation of safflower dye seeds on a vibrating seed cleaning machine with the selection of full-fledged seed material for sowing ensures an increase in the main indicators of the sowing qualities of the seeds, which increases the yield of this crop. Experimental studies have established the feasibility of using a vibrating seed cleaning machine with non-perforated working surfaces for further cleaning of seed mixtures of dyeing safflower with simultaneous sorting of the main crop seeds.

The machine can be recommended as part of technological lines for post-harvest processing of seed mixtures of safflower for dyeing.

separation, separation, cleaning, vibrating seed cleaning machine, parameters, seeds, properties, quality, safflower dye

Одержано (Received) 20.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 26.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

UDC 631.362.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.90-97](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.90-97)

Oleksandr Nesterenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasytkovskyi**, Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Kisilov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

e-mail: nov_78@ukr.net

Areas of Improvement of Feeding Devices for Pneumatic Separation Channels

Despite a significant degree of improvement of modern pneumatic separators, the method of feeding grain material into the channel remains an important issue today. The article provides an overview of feeding devices, their classification, and the design which is aimed at improving the interaction of the grain mixture with the air flow in the working area of separation. Promising directions for improving feeding devices of vertical pneumatic separating channels are outlined. On the basis of the review, the importance of practical application of additional technical means that contribute to the layering of the grain mixture both before entering and in the working area of the pneumatic separation channel is determined.

pneumatic separation, pneumatic separation channel (PSC), air flow, feeder, grain material

Problem statement. Grain mixture received from the field contains a significant amount of impurities of organic and mineral origin, weed seeds, etc. In many cases, the moisture content of impurities significantly exceeds the moisture content of the grain and significantly affects its further processing and storage [1].

When such impurities enter the pneumatic separation channel, they are usually located in the middle or lower layers of the grain flow, which significantly impairs the possibility of their further separation into the sedimentation chamber.

This problem is significantly aggravated with an increase in the specific load and, accordingly, an increase in the thickness of the layer of grain material fed into the pneumatic separation channel [2].

Under such conditions, the structure of the air flow velocity deteriorates in the pneumatic separation channel. That is, in the grain inlet zone, an increase in airflow resistance is created due to the significant density of the grain layer, which has not yet had time to stratify. Accordingly, under such conditions, the intensity of separation in the inlet zone is minimal. A similar situation is observed in the grain outlet zone, where the grain, cleaned of light impurities, flows down the back wall of the channel, thus creating a damper for the air flow [2, 3, 4].

In the centre of the pneumatic separation channel, on the contrary, the grain flow is created that is too dilute, which causes an increase in the air flow velocity significantly above the average value. This leads to the removal of full grain into the sedimentation chamber, thus worsening the quality of separation performance [2, 4].

Therefore, in order to increase the efficiency of grain separation, especially with high humidity and high contamination, it is necessary to create conditions under which the grain material is distributed as evenly as possible in the separation zone, and all components of the mixture have the same conditions for effective separation.

Statement of the task. The purpose of this study is to determine promising areas for improving and practical application of feeding devices for pneumatic separation channels to improve the efficiency of pneumatic separators in real conditions.

Main material. One of the ways to more evenly load the working area of the separation, which contributes to the levelling of the air flow velocity, is the use of feeding devices of pneumatic separation channels. Such devices should provide conditions under which grain is fed into the air flow in a thin layer [5, 6].

This can significantly improve the interaction of the components of the grain mixture with the air flow, improving the separation conditions, as well as significantly reduce their collision and increase the efficiency of the air flow [5-7].

Therefore, by creating such separation conditions and achieving a uniform supply of grain material, it is possible to obtain a significantly levelled field of air flow velocities in the separation working area, improve the quality indicators and overall technological efficiency of the separator.

At the same time, feeding devices used in pneumatic separators that ensure a uniform supply of grain material must meet the following requirements [8]:

- the design and velocity mode of their operation should ensure uniform grain feeding over the entire area of the separation zone;
- the velocity mode of the feeding device is selected taking into account the forces acting on the grain material in the area of contact with the elements of the feeding device, which ensures minimal grain damage and a rational flight path;
- the design parameters and operating modes of the feeder should be such as to ensure the required qualitative and quantitative performance of the pneumatic separator;
- the drive power of the feeder should be as low as possible.

In practice, roller, paddle, belt, aeration, disc, gravity and vibratory feeders are used, the classification of which is shown in Fig. 1.

Straight belt feeders do not allow acceleration of the grain material to the required velocity due to the aerodynamic resistance of the air medium. As a result, the velocity of movement of heavy components relative to the air does not exceed the velocity of their hovering and a batch feed occurs [9].

The fan feeder is designed to provide the grain material components with the required airflow velocity before they enter the stationary air environment. One of its main disadvantages is its low efficiency, since a significant length of air channel is required to accelerate heavy material components; otherwise the components will fly out of the feeder at the velocity significantly lower than the air flow rate in the pipe [10].

Roller feeders consist of two rollers rotating at the same velocity in opposite directions. The advantages of such feeders include compactness and simplicity of design. The disadvantages include the tendency to damage grain and deviations from the required feeding velocity in case of overloading.

Paddle feeders have a number of significant advantages over other feeders (simplicity of design, technological and structural reliability, and small overall dimensions). Therefore, this type of feeder is often used in the pneumatic separation channels of grain cleaning machines. Such feeders can throw grain material components into both moving and stationary air flow. However, the disadvantage of this type of feeder is that it feeds the grain material in portions rather than in a continuous stream, which affects the structure of the air flow.

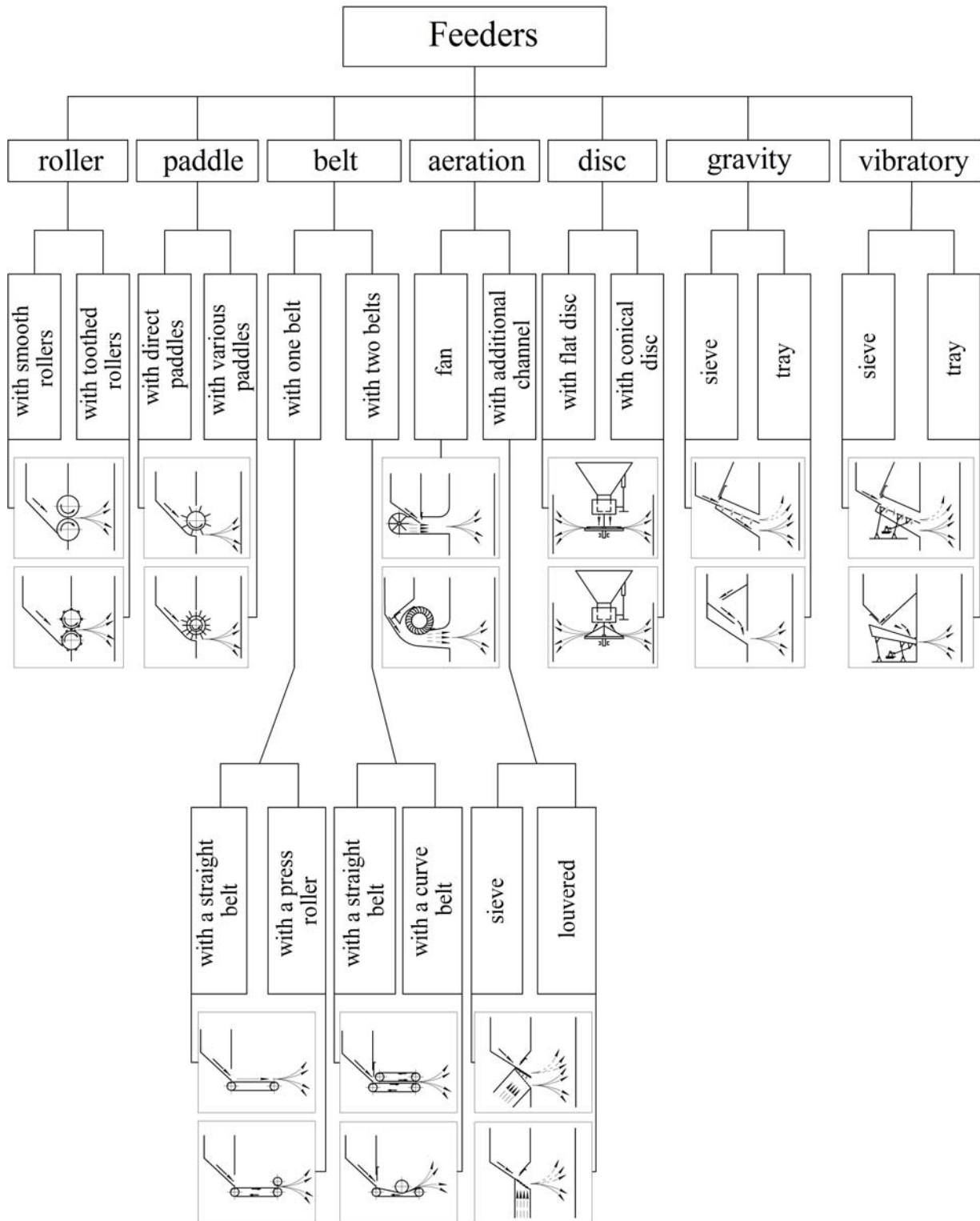


Figure 1 – Classification of pneumatic separator feeders

Source: own research

Vibratory feeders are also widely used in the pneumatic channels of grain cleaning machines. The authors of [11] developed a step-type vibrating tray in which the grain material is distributed according to its physical and mechanical properties before entering the pneumatic channel. Thus, large impurities rise to the upper layers, and the main grain to the lower ones. Studies of this type of feeder have confirmed its effectiveness.

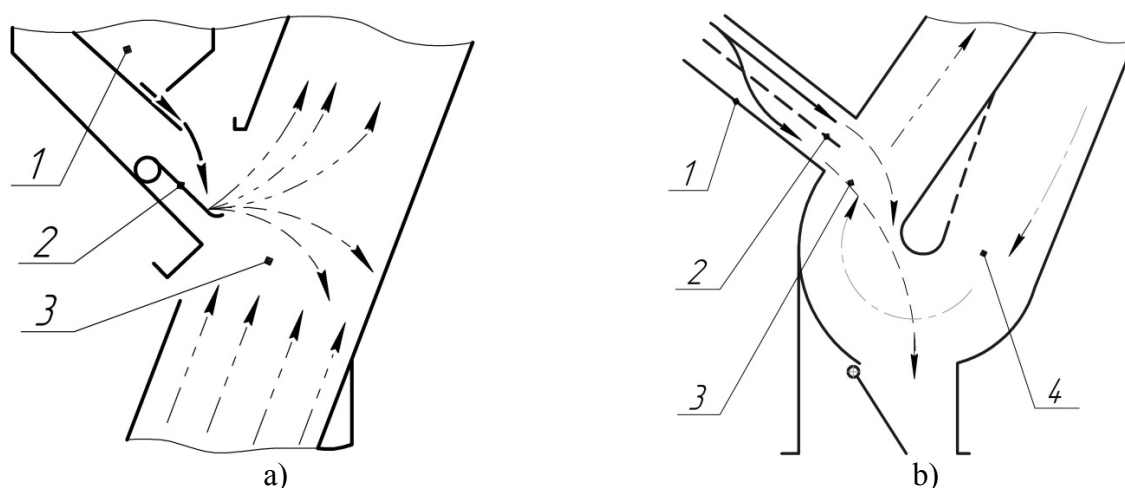
The use of aeration types of feeders makes it possible to significantly improve the distribution of grain material when it enters the pneumatic channel [10, 12]. Due to this, the grain mixture is placed in accordance with its aerodynamic properties. This allows the lighter fraction to be higher above the heavier fraction, which increases the likelihood of a clear separation of the fractions. Accordingly, the use of aeration types of feeders significantly improves the structure of the air flow and contributes to the quality of separation.

However, the main disadvantage of all active feeders, including aeration feeders, is the need for additional power supply. They also require the use of fans and electric motors, which increases the energy intensity of separation and the complexity of the design.

Gravity feeders are the most widely used due to their simplicity and reliability. One of the most common examples of such a feeder is the introduction of grain material along an inclined tray [4].

The pneumatic system of the Petkus K-560 grain cleaner [13] uses an adjustable valve as a gravity feeder (Fig. 2, a). Before entering the pneumatic separation channel, the grain material falls freely near the inlet. Hitting the surface of the valve, grain particles with different elastic properties enter the channel with different trajectories and velocities. This creates a lower density and increases the interaction of the particles with the air flow.

There is an example of the use of a sieve-type gravity feeder in the pneumatic separation channel of the MPO-50 grain cleaning machine (Fig. 2, b). Due to the application of such a feeder, heavy fraction spills through the sieve, and large impurities are located in the pneumatic channel above the main grain [14].



1 - hopper; 2 - feeding device; 3 - pneumatic separating channel; 4 - air channel

Figure – 2 Gravity feeders: a - Petkus K-560; b - MPO-50

Source: own research

This makes it possible to remove large impurities without hindrance and significantly improves the uniformity of grain distribution in the pneumatic separation channel.

When substantiating the parameters of the pneumatic system of the MZPI-10 grain cleaning machine, the use of multi-jet whiteners was proposed [15]. They form jets of grain flow that form air microchannels when the material is introduced into an inclined channel (Fig. 3, a). This helps to reduce the aerodynamic drag of the mixture and levelling the velocity of the air flow. This design is also quite simple in practical application and does not require significant changes in the design of the grain cleaning machine.

One of the promising areas of intensification of the separation process is the use of feeding devices with grain flow separation in the vertical plane. An example of this is a feeder for multi-level grain input [8, 16].

This design of the feeder ensures separation of grain material into several streams of limited capacity. They enter different working zones along the height of the pneumatic separation channel and allow for even distribution of the material in the separation zone. This helps to reduce airflow resistance in the grain inlet and outlet zones and to level the velocity curve.

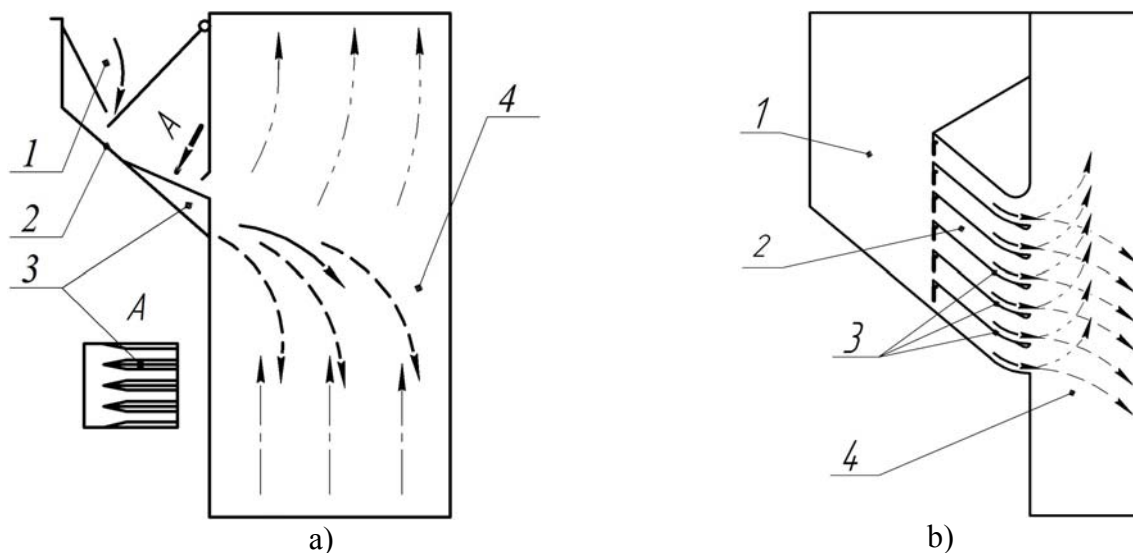


Figure 3 – Gravity feeders: a - feeder for multi-jet grain input; b - feeder for multi-level grain input
Source: own research

The results of experimental studies [17] confirm that the use of the proposed design of this type of feeder can reduce the resistance to air flow by 1.8-2 times. In case of increasing its uniformity in the separation zone, and improving the conditions for removing light impurities, which will increase the efficiency of air separation compared to other existing analogues.

Thus, based on the above review, it can be concluded that increasing the intensification of pneumatic separation is largely possible by creating optimal conditions for the interaction of grain material with the air flow. This can be achieved through the rational introduction and distribution of grain material in the working area of the pneumatic separation channel, which helps to reduce the likelihood of collisions of grain particles and reduce the resistance to air flow in the inlet area. As a result, the velocity is levelled and the probability of separation of light impurities increases.

Conclusions. The use of feeding devices improves the uniformity of the grain material distribution in the separation zone. This contributes to a significant levelling of the air flow velocity curve and improves the quality of pneumatic separation.

Gravity feeders are one of the most practical in use. They have a simple design, are low in energy consumption, and are quite reliable and easy to maintain.

The structural simplicity of some gravity feeders makes it possible to install them when developing new and improving existing grain cleaning machines. This will increase both the efficiency of pneumatic separation and the economic efficiency of such grain cleaning machines.

Список літератури

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентильовання, охолодження) / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 551 с.
2. Інтенсифікація процесу повітряної сепарації зерна / М.І. Васильковський та ін. *Збірник наукових праць Таврійської державної агротехнічної академії. Сучасні проблеми землеробської механіки*. Мелітополь, 2006. Вип. 39 . С. 161–165.
3. Васильковський М.І. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / М.І. Васильковський О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, О.В. Нестеренко . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2006. Вип.17. С. 44–48.
4. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарации на зернообработывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. С. 103-140.
5. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Аналітичні дослідження раціональної подачі зернової суміші в аспіраційний канал пневмовідцентрових сепараторів . *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2010 . Вип. 103. С. 54-61.
6. Аналітичні дослідження контактного руху легких домішок у пневмосепаруючому каналі / О.В. Нестеренко та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2017. Вип. 47, ч. 2. С. 185–191.
7. До теорії розділення зерна в повітряному потоці / Б.І. Котов та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2009. Вип. 39. С. 54 – 62.
8. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О.В. Нестеренко та ін. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. Кіровоградського нац. техн. ун-ту*. 2012. Вип. 25, Ч.1. С.49–53.
9. Аристов С.А., Косилов Н.И. Исследование затрат мощности на привод ленточных питающих устройств пневмоинерционных сепараторов . *Повышение производительности в качестве работы зерноуборочных и зерноочистительных машин: науч.тр.* 1984. С.22–24.
10. Корнеев С.В. Интенсификация рабочего процесса зерноочистительной машины предварительной очистки путём фракционирования зернового материала: дис...канд. техн. наук. Киров, 2002. . 185 с.
11. Степаненко С. П., Котов Б. І., Рудь А.В., Замрій М.А. Теоретичні дослідження процесу руху зернового матеріалу на поверхні ступінчастого віброживильника. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 25–32.
12. Результати очищення насінневої суміші сої на пневматичному сепараторі. / М.В. Бакум та ін. *Механізація сільськогосподарського виробництва : вісник Харківського нац. техн. ун-ту с.-г.* 2017. Вип. 180 . С. 13-18.
13. Проспект фирмы «Petkus». Машины предварительной и интенсивной очистки К-527, К-526, К-560.
14. Машина предварительной очистки МПО-50С. Каталог продукции ОАО Головное специализированное конструкторское бюро (ГСКБ) "ЗЕРНООЧИСТКА".
15. Васильковський М.І., Васильковський О.М., Лещенко С.М. Обґрунтування основних параметрів замкненої двохступеневої пневмосепаруючої системи ЗОМ . *Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка*. 2007. Вип. 59 . С. 177–186.
16. Спосіб введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал повітряного сепаратора: пат. (11) 9586 А Україна: МКИ В 02 В 1/00 . № a200500209; Заявл. 10.01.05; Опубл. 17.10.2005. Бюл. №10.
17. Обґрунтування параметрів живильного пристрою для багаторівневого введення зернового матеріалу у вертикальний пневмосепаруючий канал / О.В. Нестеренко та ін. *Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст.* 2016. Вип. 34. С. 92–103.

References

1. Kotov, B.I., Stepanenko, S.P. & Shvydia, V.O. et al. (2017). *Modeljuvannja tehnologichnih procesiv v tipovih ob'ektah pisljazbiral'noi obrobki i zberigannja zerna (ochishhennja, separacija, sushinnja, aktivne ventiljuvannja, oholodzhennja)* [Modelling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (cleaning, separation, drying, active ventilation, cooling)] . Nizhyn: Publisher of PE Lysenko M.M. [in Ukrainian].
2. Vasytkovskiy, M.I., Vasytkovsky, O.M., Leshchenko, S.M. [et al]. (2006) Intensyfikatsiia protsesu povitrianoi separatsii zerna [Intensification of the process of air separation of grain] . *Zbirnyk naukovykh*

- prats' Tavrijs'koi derzhavnoi ahrotekhnichnoi akademii. Suchasni problemy zemlerobs'koi mekhaniky. – Modern problems of agricultural mechanics, Issue 39*, 161-165 [in Ukrainian].
3. Vasylykovskiy, M.I., Vasylykovskiy, O.M., Leshchenko, S.M. & Nesterenko, O.V. (2006). Doslidzhennia roboty pnevmoseparuiuchoho kanalu na fizychnij modeli [Study of the operation of the pneumoseparating channel on a physical model]. *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. pr. – Machines in agricultural production, branch engineering, automation: Collection of scientific works of Kirovohrad National Technical University, Issue 17*, 44-48 [in Ukrainian].
 4. Gortinskiy, V.V., Demskiy, A.B. & Boriskin, M.A. (1980). *Processy separacii na zernoobrabatyvajushhiih predpriyatijah. [Separation processes at grain processing enterprises]. Moscow: Kolos* [in Russian].
 5. Kotov, B.I., Stepanenko, S.P., Shvets, S.A. & Shvydia, V.O. (2010). Analitichni doslidzhennia ratsional'noi podachi zernovoi sumishi v aspiratsijnyj kanal pnevmovidtsentroyvykh separatoriv [Analytical studies of the rational supply of grain mixture to the aspiration channel of pneumatic centrifugal separators]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenka – Bulletin of Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Issue 103*, 54-61 [in Ukrainian].
 6. Nesterenko, O.V. Petrenko, D.I., Pavlenko, I.I. et al. (2017). Analitichni doslidzhennia kontaktnoho rukhu lehkykh domishok u pnevmoseparuiuchomu kanali [Analytical studies of the contact motion of light impurities in the pneumatic separation channel]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. – Design, production and operation of agricultural machines: general government. between science and technology coll, Issue 47, Part 2*, 185-191 [in Ukrainian].
 7. Kotov, B.I., Stepanenko, S. P., Shvydia, V.O. et al. (2009). [To the theory of grain separation in the air flow] . *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. – Design, production and operation of agricultural machines: general government. between science and technology coll, Issue 39*, 54-62 [in Ukrainian].
 8. Nesterenko, O.V. Vasylykovskiy, O.M., Leshchenko, S.M., Petrenko, D.I. & Bohatyrev, D.V. (2012). Perspektyvnyj napriamok intensyfikatsii povitrianoi separatsii zerna [Perspective direction of intensification of air separation of grain] . *Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. pr. Kirovohrads'koho nats. tekhn. un-tu – Machines in agricultural production, branch engineering, automation: Coll. of scientific papers of Kirovohrad National Technical University. Issue 25; Part 1*, 49-53 [in Ukrainian].
 9. Aristov, S.A. & Kosilov, N.I. (1984). Issledovanie zatrat moshhnosti na privod lentochnykh pitajuchih ustrojstv pnevmoinercionnyh separatorov [Study of power consumption for the drive of belt feeders of pneumatic inertial separators] . *Povyshenie proizvoditel'nosti v kachestve raboty zernouborochnykh i zernoochistitel'nykh mashin: nauch.tr. – Increasing productivity and quality of work of grain harvesters and grain cleaning machines: Scientific and Technical Review* . Chelyabinsk, 22-24 [in Russian].
 10. Korneev, S.V. (2002). Intensifikacija rabocheho processa zernoochistitel'noj mashiny predvaritel'noj ochistki putjom frakcionirovaniya zernovogo materiala [Intensification of the working process of a grain cleaning machine of preliminary cleaning by fractionation of grain material]. *Candidate's thesis. Kirovohrad* [in Russian].
 11. Stepanenko S.P., Kotov B.I., Rud A.V., Zamriy M.A., (2022). Teoretychni doslidzhennia protsesu rukhu zernovoho materialu na poverkhni stupinchastoho vibrozhyvlynyka [Theoretical studies of the process of movement of grain material on the surface of a stepped vibrating feeder]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh – Vibrations in engineering and technology, 2 (105)*, 25-32 [in Ukrainian].
 12. Bakum, M.V., Krekot, M.M., Sheptur, O.A., Abduiev, M.M., Sinyayeva, O.V. & Tsyba, M.V. (2017). Rezultaty ochyshchennia nasinnievoi sumishi soi na pnevmatychnomu separatori. [Results of cleaning soybean seed mixture on a pneumatic separato]. *Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva : visnyk Kharkivs'koho nats. tekhn. un-tu s.-h. – Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture, Issue 180*, 13-18. [in Ukrainian].
 13. Prospekt firmy «Petkus». Mashyny predvaritel'noj i intensivnoj ochistki K-527, K-526, K-560. [Prospect of the Petkus company. Preliminary and intensive cleaning machines K-527, K-526, K-560] [in Russian].
 14. Mashina predvaritel'noj ochistki MPO-50S. [MPO-50S preliminary cleaning machine. Product catalogue of the Main Specialised Design Bureau (MSDB) "Zernoochistka"] [in Russian].
 15. Vasylykovskiy, M.I., Vasylykovskiy, O.M. & Leshchenko, S.M. (2007). Obgruntuvannia osnovnykh parametriv zamknoivoi dvokhstupenevoi pnevmoseparuiuchoi systemy ZOM [Substantiation of the main parameters of the closed two-stage pneumatic separation system of the grain cleaning machine] . *Visnyk Kharkivs'koho*

- natsional'noho tekhnichnoho universytetu im. P. Vasylenka – Bulletin of Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University, Issue 59, 177-186 [in Ukrainian].*
16. Pat. (11) 9586 A Ukraine, MKI B 02 V 1/00 (Ukraine). Sposib vvedennia zernovoho materialu v pnevmoseparuiuchy kanal povitrianoho separatora [Method of introducing grain material into the pneumatic separating channel of an air separator]. No. a200500209; stated. December 10, 2005; has been published November 17, 2005. Bul. No. 10.
 17. Nesterenko, O.V. Petrenko, D.I., Leshchenko, S.M., Vasytkovskyi, O.M. & Honcharova, S.Y. (2016). Obgruntuvannia parametriv zhyvyl'nogo prystroiu dlia bahatorivnevoho vvedennia zernovoho materialu u vertykal'nyy pnevmoseparuiuchy kanal [Substantiation of the parameters of a feeding device for multi-level input of grain material into the vertical pneumatic separating channel] . *Sil's'kohospodars'ki mashyny : zb. nauk. st. – Agricultural machines: a collection of scientific articles, Issue 34, 92-103 [in Ukrainian].*

О.В.Нестеренко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук, **Р.В. Кісільов**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кропивницький, Україна

Напрямки вдосконалення живильних пристроїв пневмосепаруючих каналів

Із підвищенням питомого навантаження та збільшенням товщини зернового матеріалу при пневмосепарації суттєво ускладнюється виділення легких домішок. Такі домішки розташовуються як правило, в середніх або в нижніх шарах зернового струменя, що значно погіршує можливість їх подальшого виділення в осадову камеру. За таких умов в пневмосепаруючому каналі спостерігається погіршення структури поля швидкостей повітряного потоку та знижуються показники якості пневмосепарації.

Для підвищення ефективності сепарації зернового матеріалу, особливо підвищеної вологості та засміченості необхідно створити такі умови, при яких зерновий матеріал буде максимально рівномірно розташовуватись в зоні сепарації, а всі компоненти суміші будуть мати однакові умови для ефективного розділення.

Одним із способів вирішення цієї задачі є застосування живильних пристроїв пневмосепаруючих каналів. Такі пристрої повинні забезпечувати умови, при яких подача зернового матеріалу в повітряний потік буде відбуватись тонким шаром. Це дозволяє значно покращити взаємодію компонентів зернової суміші з повітряним потоком, покращуючи умови розділення, а також суттєво зменшити їх зіштовхування. Тому, створивши такі умови сепарації та досягнувши рівномірної подачі зернового матеріалу, можна отримати значно вирівняне поле швидкостей повітряного потоку в робочій зоні сепарації, підвищити якісні показники та загальну технологічну ефективність роботи сепаратора.

Використання різних типів живильників має свої переваги та недоліки основних типів живильних пристроїв. Але основним недоліком всіх активних живильників, в тому числі аераційних, є необхідність додаткового енергоживлення. При цьому, найбільш широкого застосування набули гравітаційні живильники завдяки їх простоті та надійності конструкції.

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації процесу сепарації є використання живильних пристроїв з розшаруванням зернового потоку в вертикальній площині.

Конструктивна простота деяких гравітаційних живильних пристроїв дає можливість їх встановлення при розробці нових та вдосконалених існуючих зерноочисних машин. Це дасть змогу підвищити як ефективність роботи пневмосепарації так і економічну ефективність при використанні таких зерноочисних машин.

пневмосепарація, пневмосепараційний канал (ПСК), повітряний потік, живильник, зерновий матеріал

Одержано (Received) 16.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 21.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5+631.354.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.98-104](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.98-104)**Sergey Osadchy**, Prof., DSc.*Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine***Larisa Vikhrova**, Prof., PhD tech. sci., **Mariya Miroshnichenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentin Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine**e-mail: srg2005@ukr.net, vihrovalg@ukr.net, marymir@ukr.net*

Information technology for Synthesizing a Grain Mass Flow Multidimensional Optimal Stabilization System with Perturbation Feedback

The article presents a new methodology for creating information technology for designing a combined system for stabilizing the flow of bread mass at the entrance to the thresher of the grain harvester. The characteristic features of this methodology are outlined.

This makes it possible to design control systems for technological processes on the harvester taking into account external influences that are stochastic in nature.

The stage of creation of the information technology of the synthesis of the optimal combined stabilization system with feedback on the deviation of the bread mass from the average value and correction on the yield change is substantiated.

stabilization of the flow of bread mass, optimal systems, synthesis of systems, information technologies, stages of research

Formulation of the problem. In recent years, a trend in the development of grain-harvesting equipment has emerged, which consists in its computerization and operation as part of a precision farming system, which allows optimizing the modes of operation of grain-harvesting equipment according to the criteria of minimum crop losses and maximum productivity.

The results of research by scientists in the field of designing grain harvesting equipment and creating systems for stabilizing the flow of bread mass in the combine thresher [1,2] show that it is advisable to maximize the quality of grain collection by creating optimal combined systems for stabilizing the flow of bread mass at the entrance to the thresher. The structure and parameters of the specified systems should be determined taking into account the dynamics models of the stabilization object (polynomials $M1$, $P1$, Fig. 1), sensors in the feedback circuits for the deviation $K1$ and in the correction circuit for the disturbance $K2$, disturbances $\psi1$, $\psi2$ and disturbances $\phi1$, $\phi2$, inherent in the real operating conditions of the harvester, based on modern effective methods of automated design of control systems.

The concept of such an approach to the creation of automatic control systems is [4, 6] that, as a result of solving the so-called analytical design problem, even before the start of the main design of the system, the boundary lines of improving its quality should be assessed, as well as the optimal structure should be synthesized, not only the parameters the regulator, but also to determine the expediency of starting work related to the creation of a new system. At the same time, the main material and time costs for the design, manufacture and testing of the

product arise only after a positive decision has been made regarding the feasibility and quality of the system.

Analysis of recent research and publications. Studying the features of the procedures for the creation and construction of modern existing systems for stabilizing the flow of bread mass according to literary sources [1,2] allows us to identify a number of reasons that do not allow to dramatically increase the competitive capabilities of this agricultural technique. First, the differential equations of the grain harvester do not take into account the dynamic properties and design features of hydraulic transmissions operating in the mode of constant load changes. Secondly, traditional approaches to determining the structure and parameters, which are used for the development of control systems for technological processes on the harvester, are designed for the action of only regular external influences, while real disturbances and disturbances are of a stochastic nature. Thirdly, the existing methods of synthesis of optimal combined stabilization systems allow to successfully determine the structure and parameters of the two-channel controller, if the system has only one controlled source of disturbance at the input of the stabilization object.

Setting objectives. To overcome the identified shortcomings, we propose to spread the effect of the experimental and analytical method [4] of developing optimal stabilization systems in case of minimizing the fluctuations of the flow of bread mass at the entrance of the thresher of the grain harvester by developing information technology for the synthesis of the optimal combined stabilization system with feedback based on the deviation of the bread mass from average value and correction for changes in yield.

Presenting main material. Such an experimental and analytical approach allows you to drastically reduce the costs of creating an automatic control (stabilization) system due to the reduction of testing and debugging work, determining the possible limits of maximizing the quality of control even at the stage of creating a technical proposal, formalizing the procedures for synthesizing the stabilization system and analyzing its quality, bringing the final design to implementation of optimal control laws, which are found analytically.

On the other hand, the successful spread of such an approach to solving the problem of achieving objectively maximum efficiency of grain collection due to the development and implementation of an optimal combined system for stabilizing the flow of bread mass at the entrance of the thresher requires [3, 4, 6]:

1. Formulation of the task of synthesis of the combined system of stabilization of the flow of bread mass at the entrance to the thresher in terms of dynamic design [4, 5] of optimal systems of stochastic stabilization of dynamic objects.

2. The availability of information about the dynamics model of the generalized control object "the angle of inclination of the washer of the cylinder block - the flow of bread mass at the entrance to the thresher", in the form of a transfer function or a differential equation, which correspond to the work of the organizational and technical system of the grain harvester in real operating conditions.

3. Models of the dynamics of disturbance changes (field topography, crop yield), which accompany the grain collection process, and measurement noises acting on the outputs of sensors of the combined stabilization system.

4. The availability of algorithms for determining the dynamics models of the control object, sensors of measurement information, disturbances and interferences, as specified above, synthesis of optimal combined stabilization systems and analysis of their quality in real conditions of grain harvesting, appropriately adapted to the conditions of the given task.

5. Software and technical means of automated design of optimal control systems of the specified class.

Taking into account the requirements 1.-5., let's set the problem of synthesizing the optimal combined system of stabilization of the bread flow with feedback on the deviation of the bread mass from the average value and correction on the change in yield (Fig. 1) as follows.

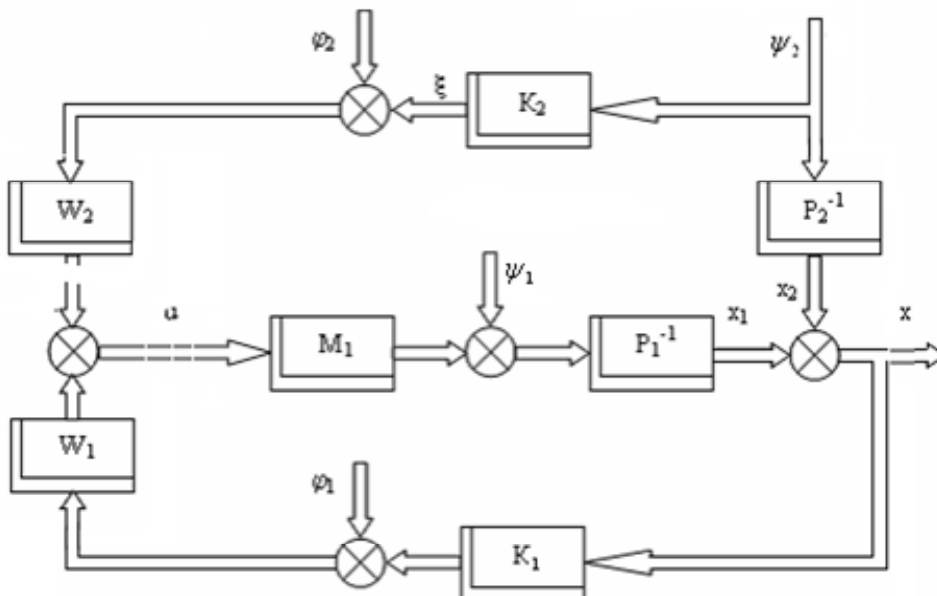


Figure 1 – Structural diagram of the combined stabilization system

Source: own research

Given:

- bread mass flow at the entrance to the thresher combine stabilization system structure;
- necessary geometric parameters of the combine;
- dynamics of bread mass flow sensors (matrix of transfer functions K_1) and yield change sensors (K_2);
- dynamics characteristics of changes in noise (errors) at the outputs of sensors, vectors φ_1 and φ_2 ;
- numerical characteristics of the change in the topography of the field ψ_1 , as a stationary random process;
- field yield map;
- a differential equation that relates the change in torque on the wheels of the combine with the change in grain flow

$$\begin{cases} P_1 x_1 = M_1 u + \psi_1 \\ P_2 x_2 = \psi_2 \\ x = x_1 + x_2 \end{cases}, \tag{1}$$

where

- x, x_1, x_2 – n -dimensional vectors of the initial coordinates of the control object;
- u – m - dimensional vector of control signals;
- P_1, P_2 - are polynomial matrices from the differentiation operator $s=d/dt$ of size $n \times n$, which determine the change in the initial coordinates of the object when the perturbation vectors ψ_1, ψ_2 change;

M_1 is a polynomial matrix from the differentiation operator s of size $n \times m$, which characterizes the sensitivity of the control object to changes in the components of the vector u .

It is necessary to determine:

- the spectral density of yield change (ψ_2) when the harvester moves at a given average speed;
- matrices P_1, P_2, M_1 of the generalized control object "the angle of inclination of the washer of the cylinder block – the flow of bread mass at the entrance to the thresher" operation under the grain harvesting conditions differential equations (1) system;
- regulator transfer functions matrices' W_1, W_2 structure and parameters, the inclusion of which in the feedback and correction circles ensures the stability of the closed-loop system "object-regulator" and minimizes the bread mass flow at the entrance to the thresher fluctuations with limited control resources in real conditions of changes in yield, field relief and measurement noise;
- the effect of using the optimal combined stabilization system and the ultimate possibilities of increasing stabilization accuracy with limited control resources in real conditions of changes in yield, field topography and noise;
- microprocessor controller functioning algorithm and structure, of the optimal combined stabilization system for bread mass flow at the entrance of the thresher.

The application of an experimental-analytical approach to the solution of the given task requires the implementation of a number of diverse but interconnected stages of scientific research, the sequence of which determines the information technology for solving the given task.

At the stage of preparation for carrying out research, it is necessary to study the features of the design of modern grain harvesters and the principles of creating models of the dynamics of the system of processing bread mass into grain. In addition, determine, if possible, models of dynamics or characteristics of changes in factors that make it difficult to achieve the maximum quality of stabilization of the flow of bread mass, and justify the choice of possible methods of automatic stabilization of such a flow. The results of experimental research conducted by us [7] showed that a sharp increase in the quality of stabilization of the flow of bread mass at the entrance to the thresher can be achieved due to the use of the combined principle of stabilization by mass deviation and yield change. However, the successful application of such a principle for the guaranteed minimization of grain mass flow fluctuations in real conditions of harvesting requires the development of new methods, techniques and means of developing optimal combined stabilization systems with correction for the disturbance acting on their output.

At the first stage of research, based on the study of methods of modern control theory and their comparison with information about the dynamics of the control object, controlled and uncontrolled disturbances and measurement disturbances, justify the choice of existing or develop new methods of synthesis of the optimal structure and parameters of combined stabilization systems, develop quality analysis algorithms such two-circuit closed systems, as well as to create a method of refining the dynamics model of the generalized control object "the angle of inclination of the washer of the cylinder block – the flow of bread mass at the entrance to the thresher".

The second stage of research completes the development of the methodology for designing an optimal combined stabilization system with deviation feedback and disturbance correction. At this stage, it is necessary to develop, based on the obtained methods of determining the dynamics of the control object, synthesis and analysis of optimal closed stabilization systems in the frequency domain: a method of determining the spectral density of yield fluctuations in the direction of movement of the grain harvester; structural identification

of the transmission function of the hydrotransmission and the spectral density of disturbances acting on it during operation in a loaded mode; technologies for researching the quality of the synthesized combined system; as well as software for factorization and separation of fractional-rational functions in the MATLAB engineering calculation system.

The implementation of the third stage of research is devoted to the evaluation of dynamics models: a generalized control object and vectors of controlled and uncontrolled perturbations that operate under the conditions of movement of a combine harvester across a field, the terrain of which and yield change randomly. The initial data for this stage consists of a field yield map, records of laboratory bench tests of the hydraulic transmission, known models of the dynamics of the longitudinal movement of the harvester, characteristics of macro irregularities of the field, which are described by a system of equations of the type (1), metrological characteristics of sensors for the flow of grain mass and yield changes. The methodological basis consists of the relevant algorithms and methods of their application, determined at stages I, II.

The purpose of the fourth stage of research is to determine the structure and parameters of the matrix of the transfer functions of the two-channel controller of the optimal combined stabilization system and the matrix of the transfer functions of the single-channel controller of the conventional optimal stabilization system, which allow to evaluate the effect of the application of the combined principle of regulation to achieve the goal of the dissertation. The initial data for the execution of these studies are the corresponding results of stage III. As a result of the synthesis of the combined stabilization system at different levels of the average yield of the field, obtain nomograms of changes in the parameters of the matrix of optimal transfer functions.

The fifth stage of research consists of two stages. At this stage, based on the transfer functions of the two-channel controller, tactical and technical characteristics of microprocessors of different architectures, and the features of modeling the dynamics of control systems in the SIMULINK environment, it is necessary to develop and apply the methodology for developing a microprocessor control system that implements the matrices of the transfer functions of the two-channel controller, as well as to simulate the operation of the synthesized system in conditions of change in the average yield level.

Conclusions. Thus, the article substantiates the composition and defines the content of operations of the new information technology for designing a combined system for stabilizing the flow of bread mass at the entrance to the thresher of the grain harvester.

The new technology has several distinctive features. First, its implementation allows obtaining differential equations of the grain harvester, which take into account the dynamic properties and design features of hydrotransmissions operating in the mode of constant load changes.

Secondly, it allows designing control systems for technological processes on the harvester, designed for the action of external influences that have a stochastic nature.

Thirdly, the new technology allows for the synthesis of optimal combined stabilization systems under the conditions of action of two multidimensional independent sources of disturbances at the input and output of the stabilization object.

List of references

1. Сисолін П.В., Коваль С.М., Іваненко І.М. Машина для збирання зернових культур методом обчислення колосків . Кіровоград : КОД, 2010. 112 с.
2. Войтюк Д.Г., Яцун С.С., Довжик М.Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посібник ; за ред. : Д. Г. Войтюка. Суми : Університетська книга, 2008. 543 с.
3. Osadchy S., Zubenko V., Fedotova M. Synthesis of an optimal stochastic stabilization system for an unstable multivariable object with time delays in controls . *2018 IEEE 5th International Conference*

- Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*», October 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine IEEE Catalog Number CFP1852Y-RPT . Київ: НАУ, 2014. pp. 114-118.
4. Osadchy S., Zubenko V., Yakoreva M. Synthesis of an Optimal Combined Multivariable Stabilization System for Adsorption Process Control ; Kuntsevich, V.M., Gubarev, V.F., Kondratenko, Y.P., Lebedev, D.V., Lysenko, V.P. (Eds). Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics, River Publishers, 2018, chapter 13. pp. 315-324
 5. Методи сучасної теорії управління: навч. посіб. / А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько, Н.М. Луцька, В.В. Іващук. К.: НУХТ, 2010. 196с.
 6. Осадчий С.І. Автоматизація динамічного проектування оптимальних багатомірних робастних систем стохастичної стабілізації . *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*, 2010. Вип. 40, ч.1 , С.25-34.
 7. Дідик О.К., Мірошніченко М.С. Синтез оптимальної системи стабілізації потоку хлібної маси зернозбирального комбайну . *Вестник национального технического университета «ХПИ» : сб. наук. праць*. Тематический выпуск «Информатика и моделирование». 2011. №36. С.48-51.

References

1. Sysolin, P.V., Koval', S.M. & Ivanenko, I.M. (2010). *Mashyny dlia zbyrannia zernovykh kul'tur metodom obchisuvannia koloskiv* [Machines for harvesting grain crops by combing ears]. Kirovohrad : KOD [in Ukrainian].
2. Vojtiuk, D.H., Yatsun, S.S. & Dovzhyk, M.Ya. (2008). *Agricultural machines: basics of theory and calculation* . D. H. Vojtiuka (Ed.). Sumy : Universytets'ka knyha [in Ukrainian].
3. Osadchy, S., Zubenko, V., Fedotova, M. (2014). Synthesis of an optimal stochastic stabilization system for an unstable multivariable object with time delays in controls . *Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*»: *IEEE 5th International Conference* (October 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine). IEEE Catalog Number CFP1852Y-RPT . Kyiv: NAU, pp.114-118 [in English].
4. Osadchy, S., Zubenko, V. & Yakoreva, M. (2018). Synthesis of an Optimal Combined Multivariable Stabilization System for Adsorption Process Control . Kuntsevich, V.M., Gubarev, V.F., Kondratenko, Y.P., Lebedev, D.V., Lysenko, V.P. (Eds). *Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics, River Publishers, 13*, 315-324 [in English].
5. Ladaniuk, A.P., Kyshen'ko, V.D., Luts'ka, N.M. & Ivaschuk, V.V. (2010). *Metody suchasnoi teorii upravlinnia* [Methods of modern management theory] . Kyiv: NUKhT [in Ukrainian].
6. Osadchyj, S.I. (2010). Avtomatyzatsiia dynamichnoho proektuvannia optymal'nykh bahatovymirnykh robastnykh system stokhastychnoi stabilizatsii [Automation of dynamic design of optimal multidimensional robust systems of stochastic stabilization] . *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohopodars'kykh mashyn: Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk – Design, production and operation of agricultural machinery: State-wide interdepartmental scientific and technical collection, Issue. 40, part.1 , 25-34* [in Ukrainian].
7. Didyk O.K., Miroshnichenko M.S. (2011). Syntez optymal'noi systemy stabilizatsii potoku khlibnoi masy zernozbyral'noho kombajnu [Synthesis of the optimal system for stabilizing the flow of bread mass of a grain harvester]. *Vestnyk natsional'noho tekhnicheskoho unyversyteta «KhPY» : sb. nauk. prats'. Tematycheskyj vypusk «Ynformatyka y modelyrovanye» – Bulletin of the National Technical University "Khpy": Sat. of science works Thematic issue "Informatics and modeling", 36, 48-51* [in Ukrainian].

С.І. Осадчий, проф., д-р техн. наук

Льотна академія національного авіаційного університету, м. Кропивницький, Україна

Л.Г. Віхрова, проф., канд. тех.наук, **М.С. Мірошніченко**, доц., канд. тех.наук, **В.П.Солдатенко**, доц., канд. тех.наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

Інформаційна технологія проектування системи автоматичної стабілізації потоку хлібної маси на вході в молотарку комбайна

У статті представлено нову методику створення інформаційних технологій проектування комбінованої системи стабілізації потоку хлібної маси на вході в молотарку комбайна. Окреслено характерні риси такої методики. Це дозволяє проектувати системи керування технологічними процесами на комбайні з урахуванням зовнішніх впливів, які мають стохастичний характер.

Обґрунтовано етапи створення інформаційної технології для синтезу оптимальної комбінованої системи стабілізації зі зворотним зв'язком за відхиленням маси хліба від середнього значення та поправкою на зміни виходу.

У статті обґрунтовано склад та визначено зміст операцій нової інформаційної технології проектування комбінованої системи стабілізації потоку хлібної маси на вході в молотарку комбайна.

Нова технологія має кілька відмінних рис. По-перше, його впровадження дозволяє отримати диференціальні рівняння зернозбирального комбайна, які враховують динамічні властивості та конструктивні особливості гідропередач, що працюють в режимі постійної зміни навантаження.

По-друге, це дозволяє проектувати системи управління технологічними процесами на комбайні, розраховані на зовнішні впливи, що мають стохастичний характер.

По-третє, нова технологія дозволяє синтезувати оптимальні комбіновані системи стабілізації в умовах наявності двох багатовимірних незалежних джерел збурень на вході та виході об'єкта стабілізації.

стабілізація потоку зернової маси, оптимальні системи, системний синтез, інформаційні технології, етапи дослідження

Одержано (Received) 27.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 05.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 621.869

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.104-112](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.104-112)

О.В. Щербак, доц., канд. техн. наук, **А.В. Сумінов**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

С.Л. Хачатурян, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: olegcherbak@gmail.com

Дослідження динамічних навантажень рами фронтального навантажувача з використанням комп'ютерних 3D моделей у середовищі Siemens NX

У статті запропоновано нове рішення з проведення аналізу міцності рами фронтального навантажувача на стадії проектування за допомогою комп'ютерних 3D моделей у середовищі Siemens NX. Даний метод дозволяє не створювати нову модель рами в металі у натуральну величину для проведення випробувань. Відповідно до запропонованого методу достатньо виконати масштабовану спрощену модель майбутньої рами, провести випробування на міцність та запропонувати конструктивні зміни щодо розробки раціональних параметрів. Такий метод дозволяє суттєво скоротити витрати на матеріали, виробництво та час виготовлення нових виробів.

міцність, рама, навантаження, випробування, 3D модель, динаміка, тривимірне комп'ютерне моделювання, Siemens NX

Постановка проблеми. У ході проектування нових будівельних та дорожніх машин використовують різноманітні комп'ютерні CAD та CAE програми. Конструктор має можливість задавати певні властивості міцності майбутній конструкції за допомогою розрахунків методом кінцевих елементів. Але вже після виготовлення першого дослідного зразка настає момент, коли для підтвердження попередніх розрахунків на міцність його потрібно випробувати на навантаження, що діють під час виконання технологічних операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням з визначення навантажень, які діють у рамках різноманітних транспортних засобів, було присвячено низку робіт: у [1] розглядається метод прогнозування життєвого циклу рами за

допомогою визначення втомної довговічності. Отримано навантаження, що діють на раму, за допомогою яких було вираховано, через який час та у яких місцях почнеться руйнування рами. Розрахунки проводились у програмі nCode DesignLife. Робота [2] присвячена дослідженню виконання робочих процесів навантажувачем у динаміці без підвіски, запропоновано заходи для зменшення вібрацій і навантажень на раму. Розрахунки проводились у програмі Adams.

Роботи [3-8] присвячені дослідженню рам вантажних машин за допомогою метода кінцевих елементів. Після аналізу було отримано наочні приклади місць впливу на раму найбільших навантажень. Підхід до динаміки транспортних засобів з використанням систем декількох тіл спрямований на подолання розриву між класичною динамікою транспортних засобів і комп'ютерною дисципліною загального призначення, відомою як аналіз систем декількох тіл (MBS), описано у роботі [9].

Питання проектування рам за допомогою сучасних CAE систем розглядалося у роботах [10-12]. Було проаналізовано статичні навантаження на серійну раму навантажувача та раму-прототип у розрахунковому комплексі Ansys. За результатами порівняння обох рам стало зрозуміло, що при однакових умовах навантажень рама-прототип показує кращі результати за навантаженням у рамі. У роботі [11] було наведено приклад випробовування вже існуючої рами навантажувача Т-156Б на втомну довговічність при статичних навантаженнях у додатку до Ansys – nCode DesignLife. Результати випробувань показали найуразливіші зони рами, у яких майже одразу виникають мікроруйнування, які у подальшому приводять до виходу з ладу всієї машини.

У роботі [12] показано новий підхід до аналізу рам. Розрахунки проводились у динаміці, що є більш наближеним до реальних умов роботи машини. Таку можливість дає програмний пакет Ansys Motion. Були розглянуті випадки виконання робочих операцій навантажувачем і продемонстрована анімація кожного випадку, на якій можна було спостерігати за зміною навантажень, які діють у рамі в режимі реального часу. Також у подальшому було проведено аналіз на втомну довговічність для кожного випадку. Таким чином було обрано найважчий випадок робочого процесу навантажувача, на який вже можна орієнтуватись при проектуванні нової рами.

У роботах [13-14] запропонована методика визначення раціональних параметрів рам спеціалізованих машин для дорожнього будівництва.

Все викладене вище підтверджує закономірність і актуальність проведення досліджень металоконструкцій з використанням сучасних комп'ютерних 3D моделей.

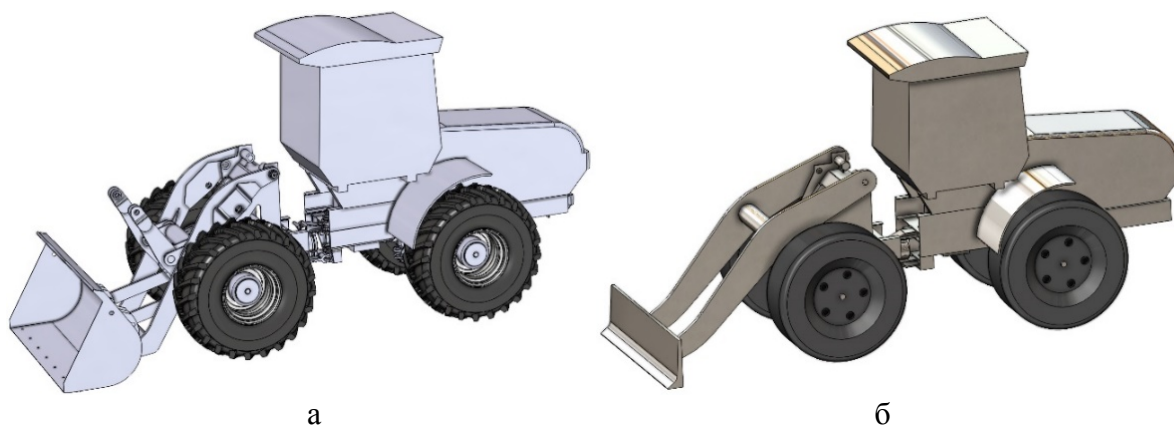
Постановка завдання. Метою роботи є порівняння результатів випробувань 3D моделей двох рам фронтального навантажувача Т-156Б. Одна з них є оригінальною (виконаною у відповідності до розмірів дійсного навантажувача), а інша зменшеною у п'ять разів подібною копією. Результатом порівняння є коефіцієнт зменшення, розрахунок якого дасть змогу визначати, яким чином і в скільки разів зменшується навантаження при масштабуванні 3D моделей.

Виклад основного матеріалу. Попередні роботи за цією тематикою були виконані у розрахунковому комплексі Ansys, але довгочасний процес розрахунку задачі, імпорту та складний процес налаштування моделі змусили перейти на більш швидкий програмний комплекс Siemens NX. Цей програмний комплекс має зрозумілий і простий інтерфейс, при цьому виконує розрахункові задачі набагато швидше за Ansys.

Методика проведення комп'ютерного моделювання динаміки робочого процесу була прийнята така. Першим кроком для моделювання динаміки робочого процесу є завантаження підготовлених 3D моделей оригінального та зменшеної моделі навантажувача (рис.1), на яких проводилися випробування. 3D моделі були виконані у

сторонній CAD програмі та конвертовані у формат STEP. Підготовка полягала в тому, щоб спростити елементи, котрі не будуть задіяні у розрахунку та об'єднати тіла, що будуть задіяні у розрахунку, в одне тіло. Це скоротило час на підготовку 3D моделі до розрахунку, а саме у встановленні взаємозв'язків і спряжень між взаємодіючими деталями.

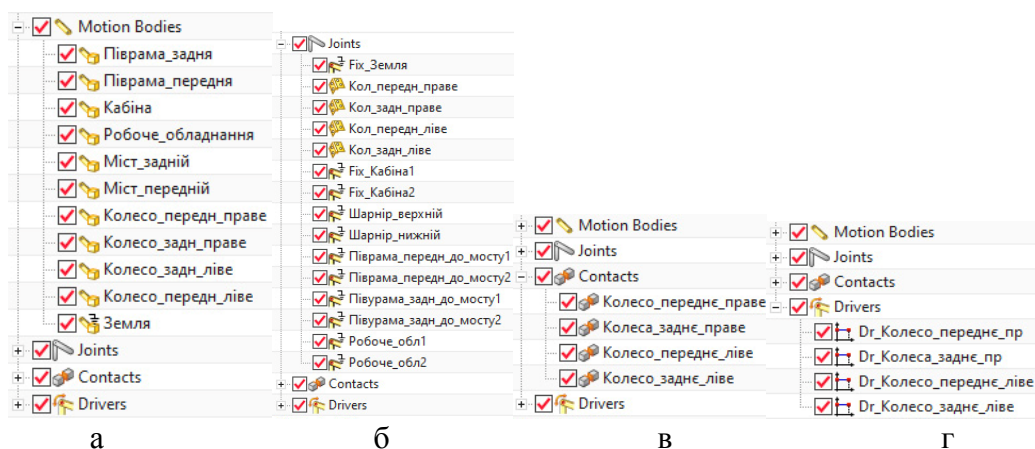
Наступний крок – потрібно вказати програмі, які тіла будуть задіяні в розрахунку, задати шарнірні взаємозв'язки тіл між собою, контакти з поверхнею та швидкість тіл, які будуть рухатись (рис. 2). Останнім кроком є встановлення відрізка часу, який буде розраховуватися.



а – модель в натуральний розмір; б – модель зменшена в 5 разів

Рисунок 1 – 3D модель навантажувача

Джерело: розроблено авторами



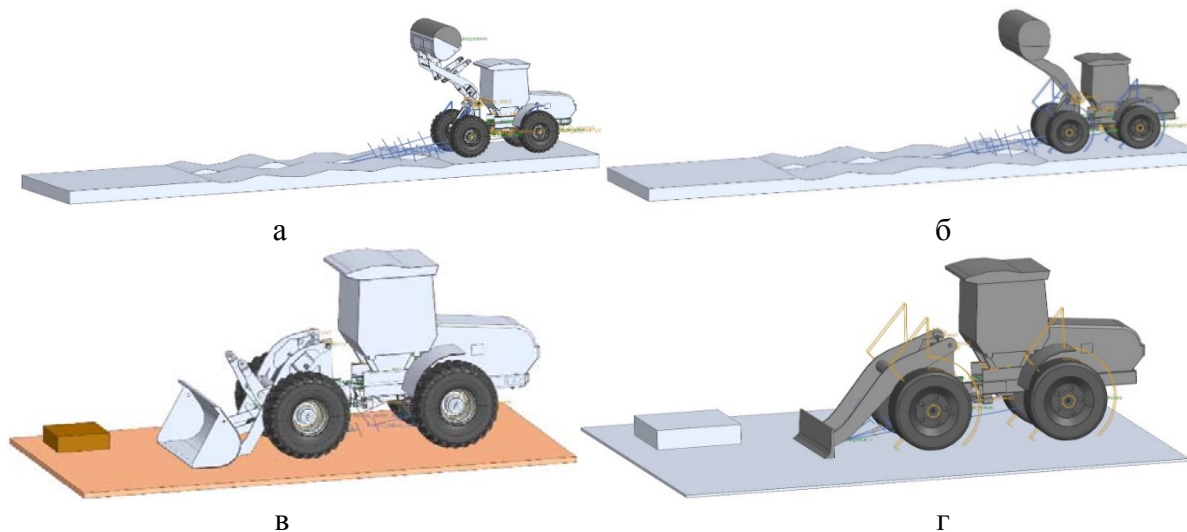
а – тіла, задіяні в розрахунку; б – шарнірні взаємозв'язки між тілами;
в – взаємозв'язок коліс з поверхнею; г – заданий рух коліс

Рисунок 2 – Вікно налаштувань

Джерело: розроблено авторами

Після налаштувань запускаємо розрахунок на виконання. У цій роботі розраховано два випадки виконання робочих операцій навантажувачем: 1 – переміщення наповненого ковша по нерівній поверхні; 2 – зіткнення з непереборною перешкодою під час наповнення ковша (рис. 3). Швидкість у першому та другому випадку для моделі натуральної величини була прийнята в 5 км/год., що відповідає реальним умовам роботи навантажувача. Навантаження рами знімалося з кріплень шарніра з'єднання напіврам.

Теорія подоби у моделюванні робочих процесів. Теорія подоби спирається на знання про розмірність фізичних величин і служить науковою основою моделювання, як методу пізнання і дослідження різноманітних об'єктів, в якій основну роль відіграє метод аналогій, тобто схожості об'єктів за деякими ознаками. Фізичні явища, процеси чи системи подібні, якщо у подібні моменти часу в подібних точках простору значення змінних величин, що характеризують стан однієї системи, пропорційні відповідним величинам іншої системи.



- а – переміщення наповненого ковша по нерівній поверхні (модель оригінального розміру);
 б – переміщення наповненого ковша по нерівній поверхні (модель зменшена в 5 разів);
 в – зіткнення з перешкодою під час наповнення ковша (модель оригінального розміру);
 г – зіткнення з перешкодою під час наповнення ковша (модель зменшена в 5 разів)

Рисунок 3 – Розрахункові положення

Джерело: розроблено авторами

3D моделі навантажувача в оригінальному розмірі та 3D модель зменшена в 5 разів є подібними. Для визначення коефіцієнту подібності виведемо результати розрахунків цих моделей у графіки діючих сил (рис. 4) та графіки крутних моментів (рис.5) для випадку переміщення наповненого ковша по нерівній поверхні, та для випадку зіткнення з перешкодою під час наповнення ковша (рис. 6) і (рис. 7) відповідно. З цих графіків визначимо максимальні значення та на їх основі розрахуємо коефіцієнт подібності сили $K_{ПФ}$ за формулою (1) та коефіцієнт подібності крутного моменту $K_{ПМ}$ за формулою (2):

$$K_{ПФ} = \frac{F_H}{F_{3М}}, \quad (1)$$

де $K_{ПФ}$ – коефіцієнт подібності сили;

F_H – максимальне значення сили, діючої на шарнір рами натуральної моделі;

$F_{3М}$ – максимальне значення сили, діючої на шарнір рами зменшеної моделі,

$$K_{ПМ} = \frac{M_H}{M_{3М}}, \quad (2)$$

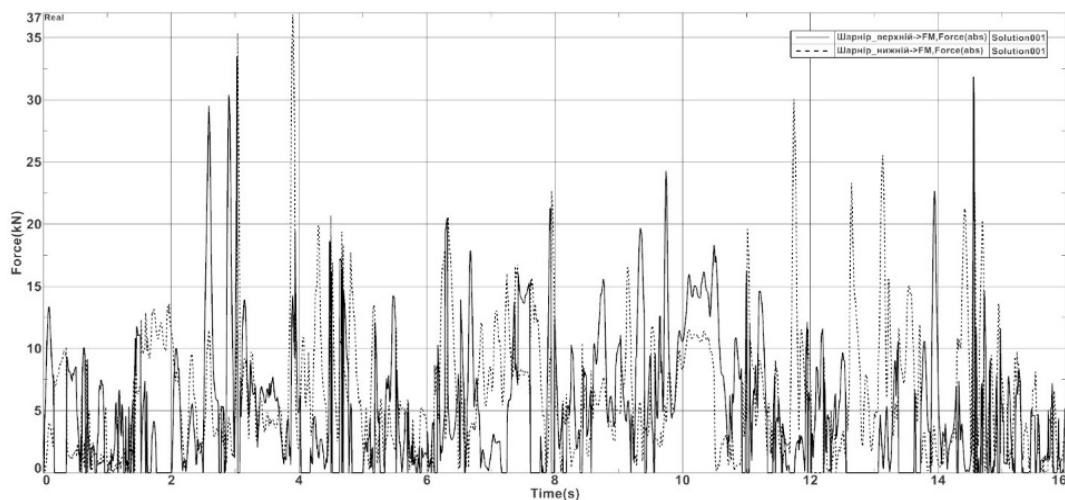
де $K_{ПМ}$ – коефіцієнт подібності крутного моменту;

M_H – максимальне значення крутного моменту, діючого на шарнір рами натуральної моделі;

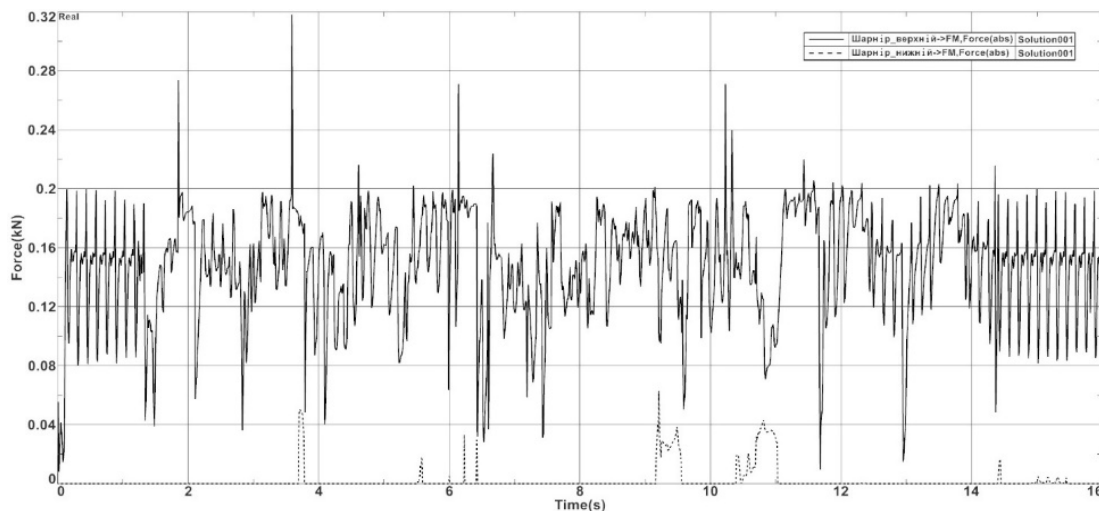
$M_{3М}$ – максимальне значення крутного моменту, діючого на шарнір рами зменшеної моделі.

У першому випадку максимальне значення зусилля дорівнює 37 кН для оригінальної рами (рис. 4, а) та $0,32 \text{ кН}$ для зменшеної рами (рис. 4, б). Значення крутного моменту для оригінальної рами становить $94000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 5, а), для зменшеної рами $78 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 5, б).

У другому випадку максимальне значення зусилля дорівнює 170 кН (рис. 6, а) для оригінальної рами та $1,48 \text{ кН}$ (рис. 6, б) для зменшеної рами. Значення крутного моменту для оригінальної рами становить $230000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 7, а), для зменшеної рами $310 \text{ Н}\cdot\text{м}$ (рис. 7, б) Таким чином, коефіцієнти подоби $K_{ПФ}$ зусилля на шарнірі рами для першого випадку буде дорівнювати $115,63$, коефіцієнт подоби крутного моменту $K_{ПМ}$ – дорівнює $1205,1$. У другому випадку відповідно $K_{ПФ}$ дорівнює $114,86$, а $K_{ПМ}$ дорівнює $741,9$.



а

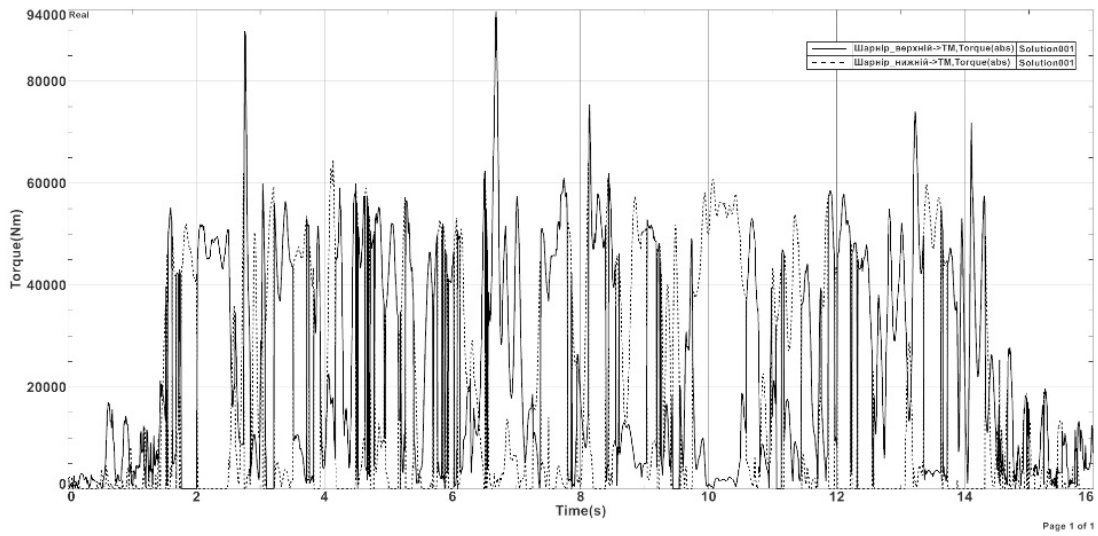


б

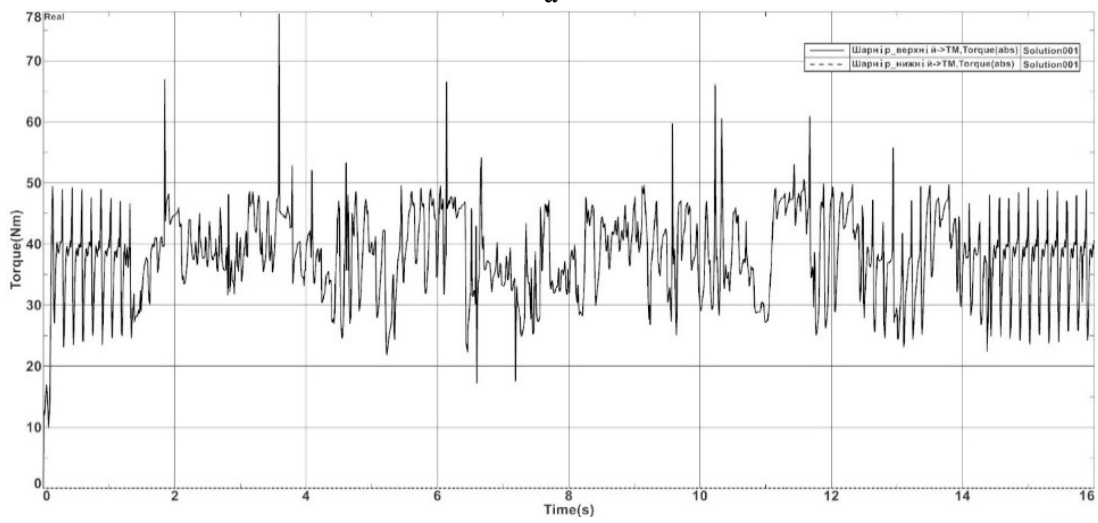
а – для моделі у натуральну величину; б – для моделі, зменшеної у 5 разів

Рисунок 4 – Графіки діючих сил на шарнір рами у випадку переміщення повного ковша по нерівній поверхні

Джерело: розроблено авторами



а

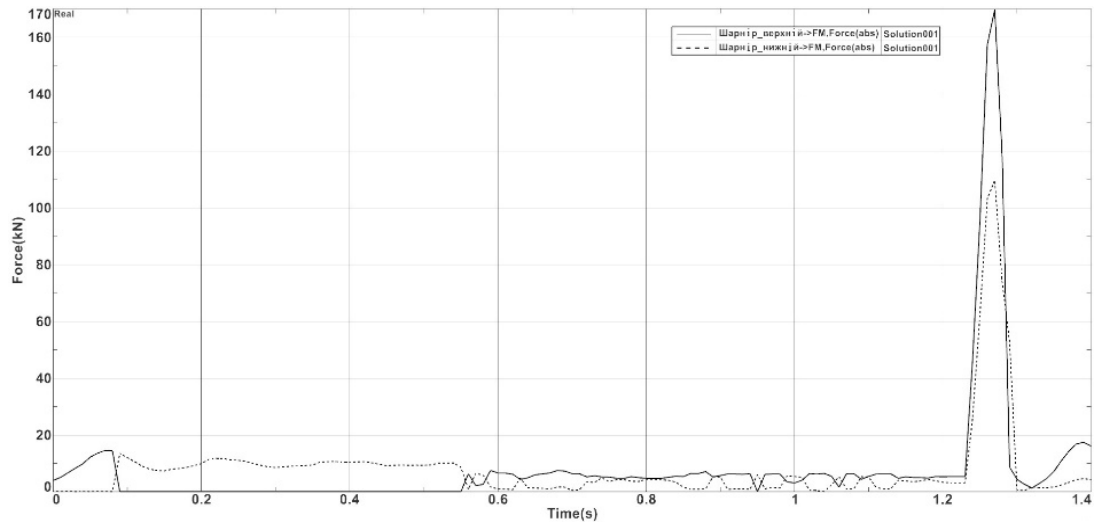


б

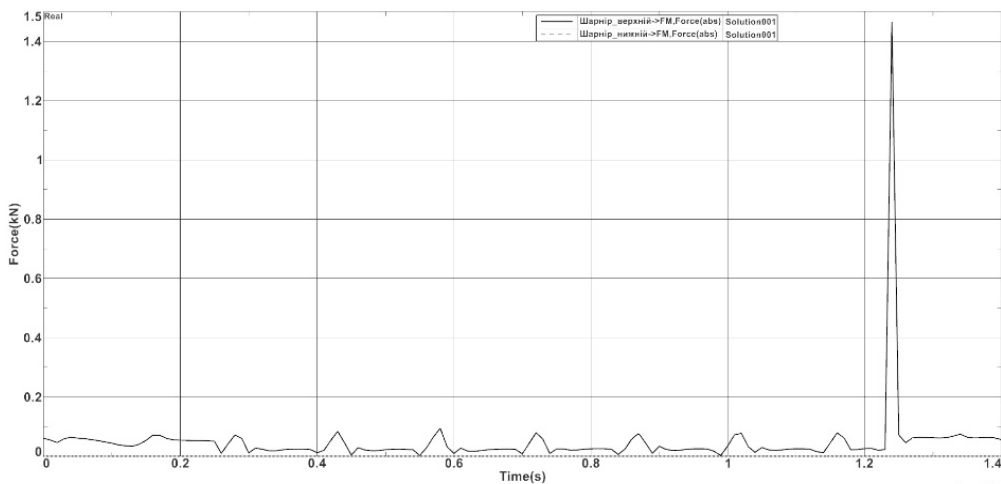
а – для моделі у натуральну величину; б – для моделі, зменшеної у 5 разів

Рисунок 5 – Графіки крутних моментів, діючих на шарнір рами у випадку переміщення повного ковша по нерівній поверхні

Джерело: розроблено авторами



а

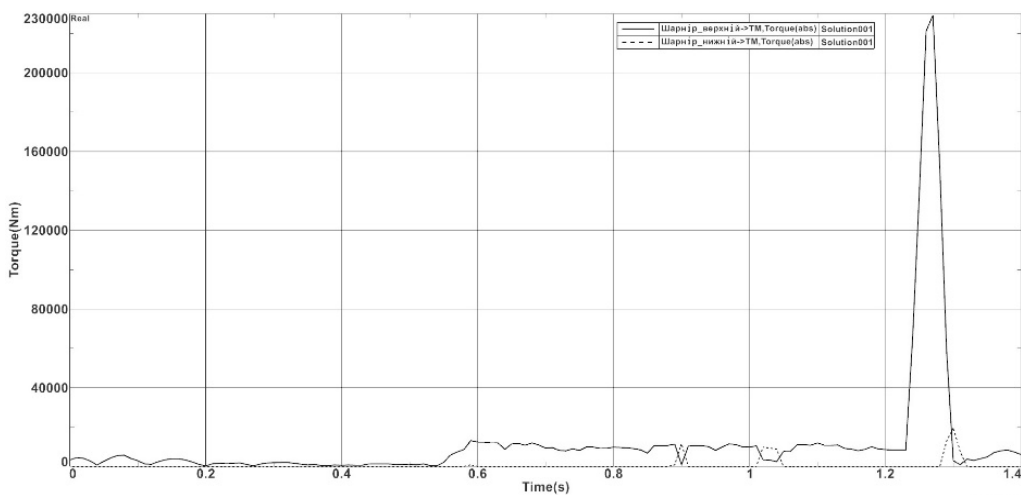


б

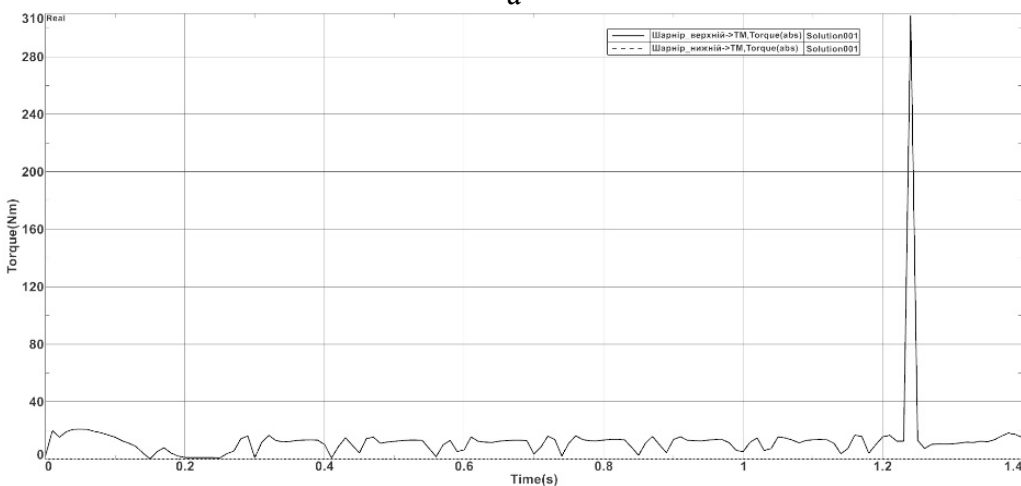
а – для моделі у натуральну величину; б – для моделі, зменшеної у 5 разів

Рисунок 6 – Графіки діючих сил на шарнір рами у випадку зіткнення з перешкодою під час наповнення ковша

Джерело: розроблено авторами



а



б

а – для моделі у натуральну величину; б – для моделі, зменшеної у 5 разів

Рисунок 7 – Графіки крутних моментів, діючих на шарнір рами у випадку зіткнення з перешкодою під час наповнення ковша

Джерело: розроблено авторами

Висновки. У роботі викладено результати проведеного комп'ютерного моделювання 3D моделей фронтального навантажувача з використанням програми NX, визначені коефіцієнти подібності для двох найбільш поширених випадків виконання навантажувачем робочих операцій: переміщення повного ковша по нерівній поверхні та зіткнення з перешкодою під час наповнення ковша. Таким чином, якщо визначені ці коефіцієнти, можна припустити, що при моделюванні нової несучої системи, виконавши зменшену її копію у відповідному масштабі та випробувавши її на навантаження засобами комп'ютерного моделювання, чи виконавши натурні випробування, можна визначити, які навантаження будуть впливати на модель з натуральними розмірами. Подальшими дослідженнями передбачається виготовлення зменшеної натурної моделі навантажувача та проведення експериментальних випробувань з метою підтвердження результатів комп'ютерного моделювання.

Список літератури

1. Liang Sun, Zhen Gwen Yuan, Shumen Zhu. Research on Fatigue Life Prediction Method of Tractor Frame. *Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019. P. 358.
2. Adam Rehnberg. Vehicle dynamic analysis of wheel loaders with suspended axles. Royal Institute of Technology Vehicle Dynamics. Stockholm, 2008.
3. Dr. R. Rajappan, M. Vivekanandhan. Static and Modal Analysis of Chassis by Using Fea. *The International Journal of Engineering and Science*. 2013. Vol. 2. Issue 2. Pp. 63-73.
4. Teo Han Fui, Roslan Abd. Rahman. Statics and dynamics structural analysis of a 4.5-ton truck chassis. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. *Jurnal Mekanikal*, December, 2007. No. 24. Pp. 56 – 67.
5. Hemant B.Patil, Sharad D.Kachave, Eknath R.Deore. Stress analysis of automotive chassis with various thicknesses. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2013. Vol. 6. Pp. 44-49.
6. Roslan Abd Rahman, Mohd Nasir Tamin, Ojo Kurdi. Stress analysis of heavy-duty truck chassis as a preliminary data for its fatigue life prediction using fem. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. *Jurnal Mekanikal* , December . 2008. No. 26 Pp. 76-85.
7. Haval Kamal Asker1, Thaker Salih Dawood and Arkan Fawzi Said. Stress analysis of standard truck chassis during ramping on block using finite element method. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. June, 2012. Vol. 7, no. 6. Pp. 641-648.
8. Gillespie T.D., Karamihas S.M. Simplified models for truck dynamic response to road inputs. *Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design*. 2000. Vol 7, No 1. Pp. 52-63.
9. Blundell M., Harty D. The multibody systems approach to vehicle dynamics, Elsevier, 2004. P. 10.
10. Кухтов В.Г., Щербак О.В., Сумінов А.В. Удосконалення методів розрахунку несучої системи шарнірного тягача. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: наук. журнал*. 2016. №5. С. 141-147.
11. Кухтов В.Г., Щербак О.В., Сумінов А.В. Розрахунок втомної довговічності несучих систем технологічних машин у nCode DesignLife. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: наук. журнал*. 2018. №13. С.193-199.
12. Щербак О.В., Сумінов А.В., Хачатурян С.Л. Розробка методики проектування спеціалізованих машин на базі шарнірного тягача. *Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр.* 2021. Вип. 95. С. 32-37.
13. Щербак О.В. Розробка раціональних параметрів з'єднувально-керуючого модуля фронтального навантажувача: дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.04 / О.В. Щербак. Х., 2002. 120 с.
14. Щербак О.В., Сумінов А.В. Розробка раціональних параметрів несучої системи шарнірного тягача. *Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр.* 2016. Вып. 73. С. 229-233.

References

1. Liang Sun, Zhengwen Yuan, Shumin Zhu. (2019). Research on Fatigue Life Prediction Method of Tractor Frame. *Conf. Series: Earth and Environmental Science*, p. 358 [in English].
2. Adam Rehnberg. (2008). *Vehicle dynamic analysis of wheel loaders with suspended axles*. Stockholm : Royal Institute of Technology Vehicle Dynamics [in English].
3. Rajappan, Dr. R. & Vivekanandhan, M. (2013). Static and Modal Analysis of Chassis by Using Fea. *The International Journal of Engineering and Science*, Vol. 2, Issue 2, Pp. 63-73 [in English].
15. Teo Han Fui & Roslan Abd. Rahman. (2007). Statics and dynamics structural analysis of a 4.5-ton truck chassis. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. *Jurnal Mekanikal*, (December), No. 24, Pp. 56 – 67 [in English].
4. Stress analysis of automotive chassis with various thicknesses. Hemant B.Patil, Sharad D.Kachave, Eknath R.Deore. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Volume 6, Issue 2013, 44-49 [in English].

5. Hemant, B.Patil, Sharad, D.Kachave & Eknath, R.Deore. (2013). Stress analysis of automotive chassis with various thicknesses. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 6., Pp. 44-49 [in English].
6. Roslan Abd Rahman, Mohd Nasir Tamin & Ojo Kurdi. (2008). Stress analysis of heavy-duty truck chassis as a preliminary data for its fatigue life prediction using fem. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia. *Jurnal Mekanikal*, (December), No. 26, Pp. 76-85 [in English].
7. Gillespie, T.D. & Karamihas, S.M. (2000). Simplified models for truck dynamic response to road inputs, *Heavy Vehicle Systems, International Journal of Vehicle Design*, Vol 7, No 1, 52-63 [in English].
8. Blundell, M., Harty, D., The multibody systems approach to vehicle dynamics, Elsevier, ISBN 0750651121, 2004. 10. [in English].
9. Kukhtov V.H., Shcherbak O.V. & Suminov A.V. (2016). Sovershenstvovanye metodov rascheta nesushchei systemy sharnyrnogo tiahacha [Improvement of calculation methods of the bearing system of the articulated tractor]. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv : nauk. zhurnal Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: science. magazine*, 5, 141-147 [in Ukrainian].
10. Kukhtov, V.H., Shcherbak, O.V. & Suminov, A.V. (2018). Raschet ustalostnoi dolhovechnosti nesushchykh system tekhnolohycheskykh mashyn v nCode DesignLife [Calculation of the fatigue life of the supporting systems of technological machines in nCode DesignLife]. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv : nauk. zhurnal Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: science. magazine*, 13, 193-199 [in Ukrainian].
11. Shcherbak, O.V., Suminov, A.V. & Khachaturian, S.L. (2021). Rozrobka metodyky proektuvannia spetsializovanykh mashyn na bazi sharnirnogo tiahacha [Development of a methodology for designing specialized machines based on an articulated tractor]. *Visnyk KhNADU: sb. nauch. tr. – Bulletin of the Khnadu: coll. of science*, Issue 95, 32-37 [in Ukrainian].
12. Shcherbak, O.V. (2002). Razrobotka ratsyonalnykh parametrov soedynytelno-upravliaiushcheho modulia frontalnoho pohruzhyka [Development of rational parameters of the connection and control module of the front-end loader: dissertation]. *Candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
13. Shcherbak, O.V. & Suminov, A.V. (2016). Razrobotka ratsyonalnykh parametrov nesushchei systemy sharnyrnogo tiahacha [– Development of rational parameters of the bearing system of the articulated tractor]. *Vestnyk KhNADU : sb. nauch. tr. – Bulletin of the Khnadu: coll. of science*, Issue 73, 229-233 [in Ukrainian].

Oleh Sherbak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Suminov**, assistant

Kharkiv National Automobile Highway University, Kharkiv, Ukraine

Serhiy Khachaturyan, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Study of Dynamic Loads of the Front Loader Frame Using 3D Computer Models in the Siemens NX Environment

When designing new construction and road machines, a variety of CAD and CAE computer programs are used. The designer has the ability to set certain strength properties of the future structure using finite element calculations, and after the first prototype is made, the moment comes when it needs to be tested for loads applied during technological operations to confirm the preliminary strength calculations. The goal of this work is to compare the test results of 3D models of two load-bearing systems of the T-156B loader, one of which is the original and the other a fivefold reduced copy.

The result of the comparison is a reduction factor, the calculation of which will allow us to determine how and how many times the load is reduced when scaling 3D models. Previous work on this topic was done in the Ansys calculation complex, but the long process of calculating the task, importing, and complex process of configuring the model forced us to switch to a faster Siemens NX software complex. This software package has a clear and simple interface while performing calculation tasks much faster than Ansys. In this work, similarity coefficients were calculated for two more common cases of forklift operations: moving a full bucket over an uneven surface and colliding with an obstacle while filling the bucket. Thus, knowing these coefficients, it can be assumed that when modeling a new load-bearing system, by making a reduced copy of it in the appropriate scale and testing it for loading by means of computer modeling, or by conducting field tests, it is possible to calculate what loads will affect the model with natural dimensions.

The article proposes a new solution for analyzing the strength of load-bearing systems at the design stage using the theory of similarity. This method makes it possible not to create a full-size model of a new load-bearing system (frame) in metal for testing. In accordance with the proposed method, it is enough to make a scaled simplified model of the future load-bearing system (frame), conduct strength tests and, in accordance with the similarity coefficient, calculate what loads will affect the full-size load-bearing system. This method can significantly reduce the cost of materials, production, and manufacturing time for new products.

strength, dynamics, three-dimensional modeling, Siemens NX, similarity theory, design

Одержано (Received) 03.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 15.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 621.316.925

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.113-122](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.113-122)

Н.Ю. Гарасьова, доц., канд. техн. наук, **А.І. Котиш**, доц., канд. техн. наук, **В.П. Солдатенко**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Зінзура**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: vasilyzinzura@gmail.com

Моделювання перехідних процесів в синхронному генераторі при витковому замиканні обмотки статора

Робота присвячена розробці математичної моделі синхронного генератора для дослідження режимів його роботи при несиметричному пошкодженні фаз обмотки статора, а саме витковому замиканні, застосування якої дасть змогу удосконалити системи релейного захисту від виткових замикань обмотки статора синхронного генератора. Показано, що для вирішення поставленої задачі дослідження доцільно використати диференціальні рівняння, що записані для осей фаз статора a , b та c . Запропоновано алгоритм розрахунку перехідних процесів в синхронному генераторі при виткових замиканнях обмотки статора, в основу якого покладено метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта четвертого порядку. Отримані результати моделювання можуть бути використані при налаштуванні систем релейного захисту синхронних генераторів, а саме захистів від виткових замикань в обмотках статора без паралельних віток.

синхронний генератор, виткове замикання, математична модель

Постановка проблеми. Основним джерелом генерації електричної енергії в Україні є теплові та гідроелектростанції з встановленими на них синхронними генераторами. Для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів і для зменшення кількості випадків пошкоджень синхронних генераторів необхідно забезпечити їх надійну роботу. Одним із найпоширеніших та найважчих пошкоджень генераторів, яке призводить до їх відключення від електричної мережі, є виткове замикання обмотки статора. Згідно Правил улаштування електроустановок, для захисту синхронних генераторів від виткових замикань застосовується поперечний диференційний захист. Проте такий захист можливо застосовувати лише на генераторах з паралельними вітками у фазі обмотки статора. Тому задача дослідження виткового замикання обмотки статора синхронного генератора без паралельних віток в фазі обмотки статора є досить актуальною, а її вирішення дасть змогу вдосконалити роботу пристроїв релейного захисту та підвищити надійність роботи синхронних генераторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час розроблено досить велику кількість методів, що дозволяють виявити виткові замикання в обмотках статора синхронних генераторів.

В роботах [1 – 6] пропонується в якості інформативного параметру наявності виткового замикання в обмотці статора використовувати параметри поля розсіювання.

Так, в роботі [1] запропоновано метод виявлення виткових замикань в обмотці статора синхронного генератора шляхом аналізу параметрів магнітного потоку поля розсіювання. Цей метод вимагає встановлення датчика магнітного потоку на осердя статора а також інструментів для здійснення інтерпретації сигналів з датчика.

В роботі [2] запропоновано метод виявлення виткових замикань синхронних генераторів, що заснований на використанні інформації, яка надходить від зовнішніх датчиків магнітного потоку, що розташовані під кутом 180° один відносно іншого. Аналогічний підхід до виявлення виткових замикань описано в роботі [3], в якій автори пропонують використовувати більшу кількість датчиків магнітного потоку для підвищення чутливості системи до виявлення пошкоджень обмотки статора.

В роботі [4] запропоновано метод аналізу інформації від датчиків магнітного потоку, який не вимагає даних про нормальний стан синхронного генератора. Даний метод заснований на використанні магнітної несиметрії, що створюється полюсами ротора у випадках пошкоджень.

В роботі [5] запропоновано метод виявлення виткових замикань в обмотці синхронного генератора, заснований на спектральному аналізі даних від датчиків магнітного потоку.

В статті [6] представлена методика виявлення виткового замикання, яка базується на статистичній обробці інформації, що надходить від зовнішніх датчиків магнітного потоку. Даний метод передбачає розрахунок коефіцієнту кореляції Пірсона між двома сигналами, що надходять від двох датчиків магнітного потоку при різних режимах навантаження. Це дозволяє з високим ступенем ймовірності виявляти пошкодження обмоток синхронних генераторів на ранніх стадіях їх появи.

Загальним недоліком методів виявлення виткових замикань, що описані в роботах [1 – 6] є необхідність використання зовнішніх датчиків магнітного потоку, що суттєво ускладнює конструкцію синхронних генераторів.

В роботі [7] пропонується метод виявлення виткових замикань, який передбачає встановлення вимірювальних котушок і датчика Холла на зубці статора генератора та навколо нього. Аналогічний підхід описано в роботі [8]: датчики магнітного поля встановлюються в пазах статора в різних місцях з метою вимірювання наведених напруг, з проведенням подальшого аналізу їх параметрів. Недоліком методів виявлення виткових замикань, описаних в роботах [7, 8] є значне ускладнення конструкції статора синхронного генератора за рахунок необхідності встановлення датчиків в його пазах.

В роботі [9] пропонується метод виявлення виткових замикань, який передбачає проведення спектрального аналізу струмів статора. Автори встановили, що із збільшенням кількості замкнутих між собою витків обмотки статора збільшуються амплітуди певних гармонічних складових струму статора, що, в свою чергу, може слугувати надійним інформативним параметром про наявність виткового замикання. Проте, в роботі [9] дослідження проводились для синхронного генератора вітряної електростанції, який за своєю конструкцією суттєво відрізняється від генераторів теплових та гідроелектростанцій.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка математичної моделі синхронного генератора для дослідження режимів його роботи при несиметричному пошкодженні фаз обмотки статора, а саме витковому замиканні, застосування якої дасть змогу удосконалити системи релейного захисту від виткових замикань обмотки статора синхронного генератора.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі при витковому замиканні обмотки статора найбільш доцільно скористатись методом математичного моделювання. Найбільш широкого застосування набув підхід до моделювання синхронного генератора з використанням рівнянь Парка-Горєва [10], що записані для поздовжньої (d) та поперечної (q) осей синхронної машини, зв'язаних з ротором. Але, застосування цих рівнянь обмежене випадком, коли при перехідних процесах не порушується симетрія фаз генератора. Тому для вирішення

поставленої задачі дослідження доцільно використати диференційні рівняння, що записані для осей фаз a , b та c статора [10]:

$$\mathbf{U}_{ms} = \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{ms} + \mathbf{E} \cdot \mathbf{r}_{ms} \cdot \mathbf{i}_{ms} \quad (1)$$

де \mathbf{U}_{ms} – матриця напруг синхронного генератора:

$$\mathbf{U}_{ms} = \begin{bmatrix} -U_{ан} & -U_{ап} & -U_b & -U_c & -U_f & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

$\boldsymbol{\Psi}_{ms}$ – матриця потокозчеплень синхронного генератора:

$$\boldsymbol{\Psi}_{ms} = \begin{bmatrix} \Psi_{ан} & \Psi_{ап} & \Psi_b & \Psi_c & \Psi_f & \Psi_{yd} & \Psi_{yq} \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

\mathbf{r}_{ms} – матриця опорів синхронного генератора:

$$\mathbf{r}_{ms} = \begin{bmatrix} r_{ан} & r_{ап} & r_b & r_c & r_f & r_{yd} & r_{yq} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

\mathbf{i}_{ms} – матриця струмів синхронного генератора:

$$\mathbf{i}_{ms} = \begin{bmatrix} i_{ан} & i_{ап} & i_b & i_c & i_f & i_{yd} & i_{yq} \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

\mathbf{E} – одинична матриця 7-го порядку;

U_a, U_b, U_c – напруги на затискачах обмоток статора;

$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, i_a, i_b, i_c$ – повні потокозчеплення та струми обмоток фаз статора відповідно;

r_a, r_b, r_c – активні опори обмоток фаз статора;

U_f – напруга на затискачах обмотки збудження;

Ψ_f, i_f – потокозчеплення і струм обмотки збудження;

r_f – активний опір обмотки збудження;

r_{yd}, r_{yq} – активні опори еквівалентних демпферних обмоток;

$\Psi_{yd}, \Psi_{yq}, i_{yd}, i_{yq}$ – потокозчеплення та струми еквівалентних демпферних обмоток по поздовжній та поперечній осям відповідно.

Індекси «н» та «п» відповідають непошкодженій та пошкодженій частині обмотки, при цьому $U_{ан} = U_a, U_{ап} = 0$.

Потокозчеплення обмоток фаз статора з обмоткою збудження і демпферними контурами можуть бути записані у вигляді:

$$\boldsymbol{\Psi}_{ms} = \mathbf{L}_{ms} \mathbf{i}_{ms}, \quad (6)$$

де \mathbf{L}_{ms} – матриця індуктивностей синхронного генератора:

$$\mathbf{L}_{ms} = \begin{bmatrix} l_{ан} & l_{анп} & l_{анb} & l_{анc} & l_{anf} & l_{анyd} & l_{анyq} \\ l_{апан} & l_{ап} & l_{апb} & l_{апc} & l_{апf} & l_{апyd} & l_{апyq} \\ l_{бан} & l_{бап} & l_b & l_{bc} & l_{bf} & l_{byd} & l_{byq} \\ l_{сан} & l_{сап} & l_{cb} & l_c & l_{cf} & l_{cyd} & l_{cyq} \\ l_{фан} & l_{фап} & l_{fb} & l_{fc} & l_f & l_{fyd} & 0 \\ l_{yдан} & l_{yдап} & l_{ydb} & l_{ydc} & l_{ydf} & l_{yd} & 0 \\ l_{yqан} & l_{yqап} & l_{yqb} & l_{yqc} & 0 & 0 & l_{yq} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $l_{ан}, l_{ап}, l_b, l_c$ – власні індуктивності обмоток фаз статора;

l_f, l_{yd}, l_{yq} – власні індуктивності ротора і демпферних обмоток;
 $l_{анап}, l_{анб}, l_{анс}, l_{анб}, l_{анс}, l_{bc}$ – взаємні індуктивності обмоток фаз статора;
 $l_{anf}, l_{anf}, l_{bf}, l_{cf}$ – взаємні індуктивності обмоток фаз статора з обмоткою збудження;

$l_{ануд}, l_{ануд}, l_{буд}, l_{суд}$ – взаємні індуктивності обмоток фаз статора з демпферною обмоткою по продольній осі;

$l_{ануq}, l_{ануq}, l_{буq}, l_{суq}$ – взаємні індуктивності обмоток фаз статора з демпферною обмоткою по поперечній осі.

Слід відмітити, що матриця \mathbf{L}_{ms} симетрична відносно головної діагоналі, тобто $l_{ij} = l_{ji}$.

Коефіцієнти взаємоіндукції (а для генераторів з явновираженими полюсами і коефіцієнти самоіндукції) являються тригонометричними функціями кута повороту ротора і можуть бути представлені при врахуванні тільки двох перших членів розкладання в ряд Фур'є. Враховуючи це вирази для знаходження елементів матриці індуктивностей \mathbf{L}_{ms} можливо записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 l_{ан} &= k_1 (l_0 + l_2 \cos 2\gamma); & l_{ан} &= k_2 (l_0 + l_2 \cos 2\gamma); \\
 l_b &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma - 2\pi/3); & l_c &= l_0 + l_2 \cos 2(\gamma + 2\pi/3); \\
 l_{анап} &= k_3 (l_0 + l_2 \cos 2\gamma); & l_{анб} &= k_4 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3)); \\
 l_{анс} &= k_5 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3)); & l_{анб} &= k_6 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma - 2\pi/3)); \\
 l_{анс} &= k_7 (-m_0 + l_2 \cos(2\gamma + 2\pi/3)); & l_{bc} &= -m_0 + l_2 \cos 2\gamma; \\
 l_{anf} &= k_8 (l_{afd} \cos \gamma); & l_{anf} &= k_9 (l_{afd} \cos \gamma); \\
 l_{bf} &= l_{afd} \cos(\gamma - 2\pi/3); & l_{cf} &= l_{afd} \cos(\gamma + 2\pi/3); \\
 l_{ануд} &= k_{10} (l_{ayd} \cos \gamma); & l_{ануд} &= k_{11} (l_{ayd} \cos \gamma); \\
 l_{буд} &= l_{ayd} \cos(\gamma - 2\pi/3); & l_{суд} &= l_{ayd} \cos(\gamma + 2\pi/3); \\
 l_{ануq} &= -k_{12} (l_{ayq} \sin \gamma); & l_{ануq} &= -k_{13} (l_{ayq} \sin \gamma); \\
 l_{буq} &= -l_{ayq} \sin(\gamma - 2\pi/3); & l_{суq} &= -l_{ayq} \sin(\gamma + 2\pi/3);
 \end{aligned} \tag{8}$$

де γ – кут між віссю фази та поздовжньою віссю ротора;

l_{afd} – взаємна індуктивність фази a статора і обмотки збудження при співпадінні їх магнітних осей;

l_{ayd}, l_{ayq} – взаємні індуктивності фази a обмотки статора і демпферних обмоток по поздовжній і поперечній осям, відповідно, при співпадінні їх магнітних осей;

l_0, l_2 – індуктивності, що визначаються за виразами:

$$l_0 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} = \frac{L_d + L_q}{2}; \quad l_2 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} = \frac{L_d - L_q}{2}. \tag{9}$$

Коефіцієнти $k_1 - k_{13}$ залежать від кількості замкнених витків фази a .

Система (1) містить потокозчеплення, що стоять під знаком диференціалу. Отримати похідні потокозчеплень у часі можна з системи алгебраїчних рівнянь (6):

$$\frac{d}{dt} \Psi_{ms} = \frac{d\mathbf{L}_{ms}}{dt} \mathbf{i}_{ms} + \frac{d\mathbf{i}_{ms}}{dt} \mathbf{L}_{ms} \tag{10}$$

Похідні індуктивностей, що входять до системи рівнянь (10), можуть бути отримані з системи рівнянь (8). Враховуючи, що $d\gamma/dt = \omega$ вирази для знаходження елементів матриці $d\mathbf{L}_{ms}/dt$ можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 \frac{dl_{an}}{dt} &= -2\omega k_1 l_2 \sin(2\gamma); & \frac{dl_{an}}{dt} &= -2\omega k_2 l_2 \sin(2\gamma); \\
 \frac{dl_b}{dt} &= -2\omega l_2 \sin(2\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_c}{dt} &= -2\omega l_2 \sin(2\gamma + 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anap}}{dt} &= -2\omega k_3 l_2 \sin(2\gamma); & \frac{dl_{anb}}{dt} &= -2\omega k_4 l_2 \sin(2\gamma - 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anc}}{dt} &= -2\omega k_5 l_2 \sin(2\gamma + 2\pi/3); & \frac{dl_{anb}}{dt} &= -2\omega k_6 l_2 \sin(2\gamma - 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{anc}}{dt} &= -2\omega k_7 l_2 \sin(2\gamma + 2\pi/3); & \frac{dl_{bc}}{dt} &= -2\omega l_2 \sin(2\gamma); \\
 \frac{dl_{ayf}}{dt} &= -\omega k_8 l_{afd} \sin \gamma; & \frac{dl_{ayf}}{dt} &= -\omega k_9 l_{afd} \sin \gamma; \\
 \frac{dl_{bf}}{dt} &= -\omega l_{afd} \sin(\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_{cf}}{dt} &= -\omega l_{afd} \sin(\gamma + 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{ayyd}}{dt} &= -\omega k_{10} l_{ayd} \sin \gamma; & \frac{dl_{ayyd}}{dt} &= -\omega k_{11} l_{ayd} \sin \gamma; \\
 \frac{dl_{byd}}{dt} &= -\omega l_{ayd} \sin(\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_{cyd}}{dt} &= -\omega l_{ayd} \sin(\gamma + 2\pi/3); \\
 \frac{dl_{ayyq}}{dt} &= -\omega k_{12} l_{ayq} \cos \gamma; & \frac{dl_{ayyq}}{dt} &= -\omega k_{13} l_{ayq} \cos \gamma; \\
 \frac{dl_{byq}}{dt} &= -\omega l_{ayq} \cos(\gamma - 2\pi/3); & \frac{dl_{cyq}}{dt} &= -\omega l_{ayq} \cos(\gamma + 2\pi/3).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Підставляючи рівняння (11) в систему рівнянь (10) і в систему рівнянь (1) отримаємо систему, яка складається з семи диференціальних рівнянь відносно похідних струмів $i_{an}, i_{ap}, i_b, i_c, i_f, i_{yd}, i_{yq}$:

$$\begin{aligned}
 k_{ij} \frac{di_{an}}{dt} + k_{ij} \frac{di_{ap}}{dt} + k_{ij} \frac{di_b}{dt} + k_{ij} \frac{di_c}{dt} + k_{ij} \frac{di_f}{dt} + k_{ij} \frac{di_{yd}}{dt} + k_{ij} \frac{di_{yq}}{dt} = \\
 = F_i(U_i, i_{an}, i_{ap}, i_b, i_c, i_f, i_{yd}, i_{yq})
 \end{aligned} \tag{12}$$

де $k_{ij}; i=1 \dots 7; j=1 \dots 7$ – коефіцієнти, що залежать від часу;

$F_i; i=1 \dots 7$ – функції, що залежать від напруги контура і струмів.

Така система може бути розв'язана методами чисельного інтегрування. В роботі використовувався метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта четвертого порядку. Цей метод потребує представлення диференціальних рівнянь системи (12) у формі Коші, для того, щоб у кожний момент часу можна було визначити величину похідної.

Але, виразити систему, що отримана, у формі Коші достатньо складно. Тому при чисельному інтегруванні для кожного моменту часу розраховуються значення коефіцієнтів k_{ij} , а потім, використовуючи матричні методи, система (12) розв'язується відносно похідних струмів. Напруга на затискачах генератора розраховується з врахуванням його електричної віддаленості від системи нескінченної потужності.

Блок-схема алгоритму роботи програми представлена на рис. 1.

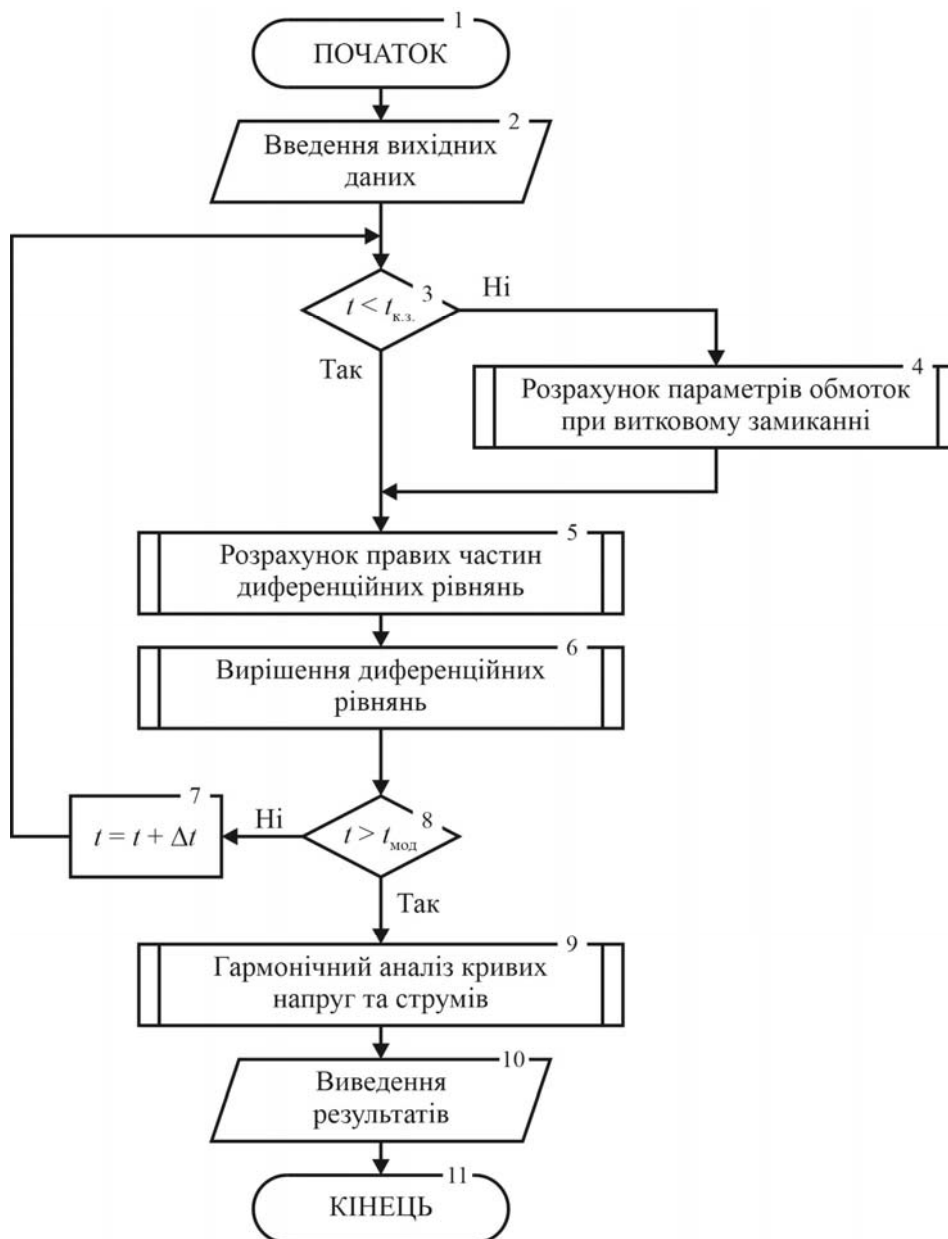


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму роботи програми розрахунків перехідних процесів в синхронному генераторі при виткових замиканнях обмотки статора

Джерело: розроблено авторами

На рис. 1 $t_{к.з.}$ – момент часу виникнення короткого замикання, Δt – крок моделювання, $t_{мод.}$ – час моделювання.

При виникненні виткових замикань, частина обмотки, що замикається накоротко, не приймає участі у формуванні е.р.с. фази. Таким чином, виткові замикання приводять до зменшення фазної е.р.с. по амплітуді та зміні по фазі.

У контурі, що замкнувся, також буде наводитись е.р.с. пропорційна кількості замкнених витків. Таким чином, у замкнутому контурі буде протікати струм короткого замикання, який і являється основною причиною пошкодження обмотки статора і оплавлення активної сталі.

За допомогою розробленої математичної моделі було проведено розрахунок значень струмів і напруг генератора при виткових замиканнях обмотки статора для турбогенератора ТВВ-200-2. Графіки зміни струмів та напруг статора в усталеному режимі роботи генератора при номінальному навантаженні наведено на рис. 2.

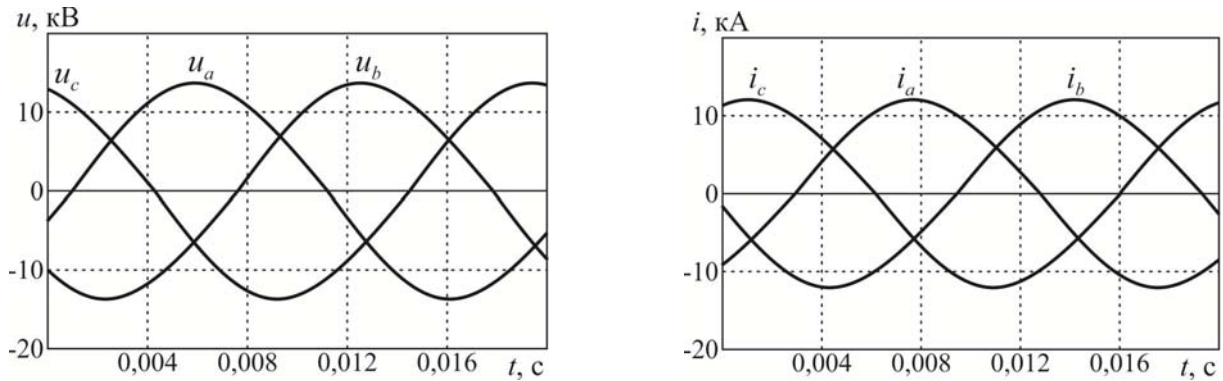


Рисунок 2 – Залежності $u = f(t)$ та $i = f(t)$ на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в номінальному режимі

Джерело: розроблено авторами

На рис. 3 - 5 наведено перший період перехідного процесу при замиканні 10 %, 40 % і 60 % витків фази A відповідно.

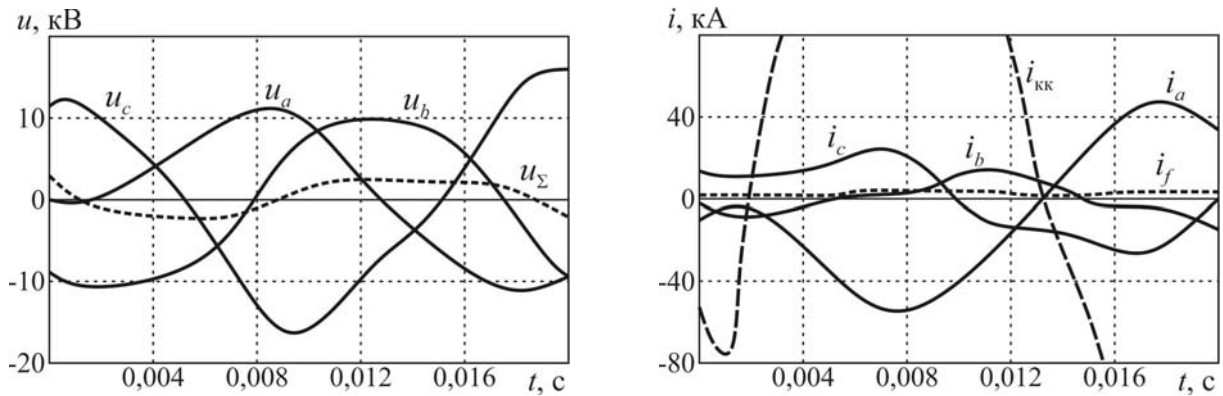


Рисунок 3 – Залежності $u = f(t)$ та $i = f(t)$ на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в перший період перехідного процесу при замиканні 10 % фази a

Джерело: розроблено авторами

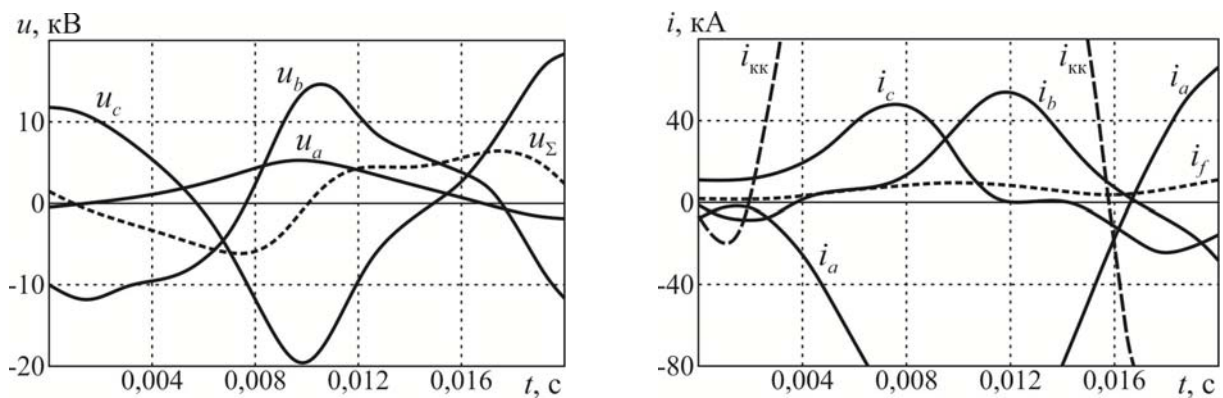


Рисунок 4 – Залежності $u = f(t)$ та $i = f(t)$ на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в перший період перехідного процесу при замиканні 40 % фази a

Джерело: розроблено авторами

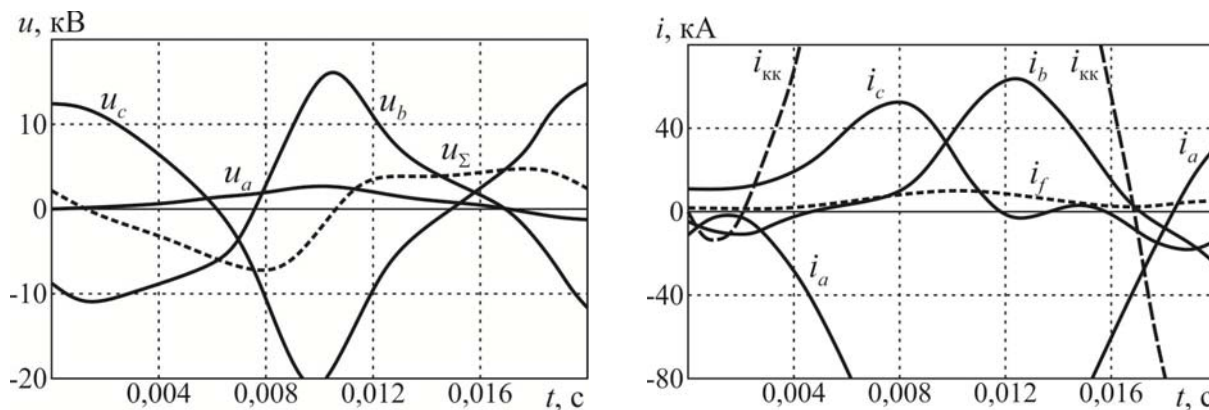


Рисунок 5 – Залежності $u = f(t)$ та $i = f(t)$ на затискачах статорної обмотки генератора ТВВ-200-2 в перший період перехідного процесу при замиканні 60 % фази a

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки показують, що амплітуда першої гармоніки напруги пошкодженій фази зменшується наступним чином: при замиканні 10 % фази – на 21 %; при замиканні 40 % фази – на 77 %; при замиканні 60 % фази – на 89 %.

Амплітуда першої гармоніки струму пошкодженій фази збільшується при замиканні 10 % фази – в 3,74 рази, 40 % фази – в 7,13 рази, 60 % фази – в 7,8 рази. Струм в короткозамкненому контурі максимальний при замиканні 10 % фази і сягає значення до 1 МА.

Отримані результати моделювання можуть бути використані при налаштуванні систем релейного захисту синхронних генераторів, а саме захистів від виткових замикань в обмотках статора без паралельних віток.

Висновки. В результаті проведених наукових досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Розроблена математична модель синхронного генератора дозволяє проводити дослідження перехідних процесів при витковому замиканні обмотки статора.

2. Результати математичного моделювання перехідних процесів, що протікають в генераторі ТВВ-200-2 при замиканні різної кількості витків фази статора показали, що зниження напруги основної гармоніки на затискачах генератора у пошкодженій фазі при замиканні 10 %, 40 % і 60 % витків обмотки складає відповідно 21 %, 77 % і 89 %. При цьому спостерігається збільшення амплітуди першої гармоніки струму пошкодженій фази в 3,7...7,8 разів.

3. Результати досліджень дають змогу удосконалити системи релейного захисту синхронних генераторів, а саме захисти від виткових замикань в обмотках статора без паралельних віток.

Список літератури

1. Sasic M., Stone G. C., Stein J., & Stinson C. Detecting turn shorts in rotor windings: A new test using magnetic flux monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2013. 19(2). Pp. 63-69. doi:10.1109/MIAS.2012.2215644
2. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., Romary, R., & Demian, C. Information fusion with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. 65(3). 2642-2652. doi:10.1109/TIE.2017.2745408
3. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., & Romary, R. Stray flux multi-sensor for stator fault detection in synchronous machines. *Electronics (Switzerland)*. 2021. 10(18) doi:10.3390/electronics10182313

4. Pusca, R., Romary, R., Touti, E., Livinti, P., Nuca, I., & Ceban, A. Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in ac machines measuring the external magnetic field. *Energies*. 2021. 14(4). doi:10.3390/en14041132
5. Ehya, H., Nysveen, A., & Nilssen, R. Pattern recognition of inter-turn short circuit fault in wound field synchronous generator via stray flux monitoring. *Paper presented at the Proceedings - 2020: International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*. 2631-2636. doi:10.1109/ICEM49940.2020.9270986
6. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., & Romary, R. Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2019. 55(3). 2682-2689. doi:10.1109/TIA.2019.2899560
7. Elez, A., Car, S., & Tvorčić, S. Air gap magnetic field - key parameter for synchronous and asynchronous machine fault detection. *International Review of Electrical Engineering*. 2013. 8(3). 981-988.
8. Afrandideh, S., Milasi, M. E., Haghjoo, F., & Cruz, S. M. A. Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2020. 35(1). 292-301. doi:10.1109/TEC.2019.2951528
9. Ibrahim, R. K., & Watson, S. Stator winding fault diagnosis in synchronous generators for wind turbine applications. Paper presented at the IET Conference Publications, 2016 (CP694) doi:10.1049/cp.2016.0550.
10. Melkebeek Jan A. *Electrical Machines and Drives Fundamental s and Advanced Modelling* [Electronic resource] / Jan A. Melkebeek. Springer, 2018. 734 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72730-1>

References

1. Sasic, M., Stone, G. C., Stein, J., & Stinson, C. (2013). Detecting turn shorts in rotor windings: A new test using magnetic flux monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*, 19(2), 63-69. doi:10.1109/MIAS.2012.2215644 [in English].
2. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., Romary, R., & Demian, C. (2018). Information fusion with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(3), 2642-2652. doi:10.1109/TIE.2017.2745408 [in English].
3. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefèvre, E., Mercier, D., & Romary, R. (2021). Stray flux multi-sensor for stator fault detection in synchronous machines. *Electronics (Switzerland)*, 10(18) doi:10.3390/electronics10182313 [in English].
4. Pusca, R., Romary, R., Touti, E., Livinti, P., Nuca, I., & Ceban, A. (2021). Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in ac machines measuring the external magnetic field. *Energies*, 14(4), doi:10.3390/en14041132 [in English].
5. Ehya, H., Nysveen, A., & Nilssen, R. (2020). Pattern recognition of inter-turn short circuit fault in wound field synchronous generator via stray flux monitoring. Paper presented at the Proceedings - 2020 : *International Conference on Electrical Machines, ICEM 2020*, 2631-2636. doi:10.1109/ICEM49940.2020.9270986 [in English].
6. Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., & Romary, R. (2019). Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2682-2689. doi:10.1109/TIA.2019.2899560 [in English].
7. Elez, A., Car, S., & Tvorčić, S. (2013). Air gap magnetic field - key parameter for synchronous and asynchronous machine fault detection. *International Review of Electrical Engineering*, 8(3), 981-988.
8. Afrandideh, S., Milasi, M. E., Haghjoo, F., & Cruz, S. M. A. (2020). Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(1), 292-301. doi:10.1109/TEC.2019.2951528 [in English].
9. Ibrahim, R. K., & Watson, S. (2016). Stator winding fault diagnosis in synchronous generators for wind turbine applications. Paper presented at the IET Conference Publications, 2016 (CP694) doi:10.1049/cp.2016.0550 Retrieved from www.scopus.com [in English].
10. Melkebeek, Jan A. (2018). *Electrical Machines and Drives Fundamental s and Advanced Modelling*. Springer, 734 p. Retrieved from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-72730-1> [in English].

Nataliia Harasova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kotysh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Valentyn Soldatenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasyl Zinzura**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Simulation of Transient Processes of a Synchronous Generator in the Case of a Turn Short Circuit of the Stator Winding

The purpose of this study is to develop a mathematical model of a synchronous generator to study its modes of operation in the case of asymmetric damage to the phases of the stator winding, namely twisting, the use of which will make it possible to improve relay protection systems against twisting of the stator winding of a synchronous generator.

Transverse differential protection is used to protect synchronous generators from winding circuits. However, such protection can be used only on generators with parallel branches in the phase of the stator winding. In the work, a mathematical model of a synchronous generator was developed, which allows to study the transient processes of the generator in case of the appearance of turn short circuits in the stator winding. This mathematical model is based on differential equations written for the stator phase axes a, b and c. An algorithm for calculating transient processes in a synchronous generator is proposed.

In turn-to-turn circuits of the stator winding, which is based on the fourth-order Runge-Kutt numerical integration method. With the help of the developed mathematical model, the values of currents and voltages of the generator were calculated in the case of short-circuits of the stator winding for the TVB-200-2 turbogenerator.

The results of mathematical modeling of the transient processes taking place in the TVB-200-2 generator when closing a different number of turns of the stator phase showed that the reduction of the fundamental harmonic voltage at the terminals of the generator in the damaged phase when closing 10 %, 40 %, and 60 % of the winding turns is, respectively, 21 %, 77 % and 89 %. At the same time, there is an increase in the amplitude of the first harmonic of the current of the damaged phase by 3.7 to 7.8 times. The obtained research results make it possible to improve relay protection systems for synchronous generators, namely protection against turn-to-turn circuits in stator windings without parallel branches.

synchronous generator, turn-to-turn short-circuit, math modeling

Одержано (Received) 04.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 628.852.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.123-129](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.123-129)

І.В. Савеленко, доц., канд. техн. наук, **К.Г. Петрова**, доц., канд. техн. наук,
А.І. Котиш, доц., канд. техн. наук, **О.І. Сіріков**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: ivan.savelenko@gmail.com

Оптимізація параметрів мікроклімату в навчальних закладах з системами локальної рекуперації повітря

Розроблена система автоматичного керування локальною рекуперацією повітря, яка гарантує оптимальні параметри мікроклімату у приміщеннях навчальних закладів. Застосовано комп'ютерне імітаційне моделювання системи керування мікрокліматом на основі температури та концентрації CO₂. Виявлено переваги запропонованої системи, яка зменшила тривалість періоду з перевищенням максимально допустимого рівня концентрації CO₂ на 49,5%, а також знизила значення концентрації CO₂ на 13,1%, при відповідних межах температури.

система локальної рекуперації повітря, мікроклімат приміщення, система автоматичного керування, якість повітря

Постановка проблеми. Забезпечення комфортного теплового та повітряного режиму у навчальних приміщеннях має велике значення для здоров'я та працездатності як учнів, так і вчителів. Невідповідність нормативним значенням температури повітря в приміщеннях, особливо в поєднанні з підвищеною вологістю, призводить до збільшення втрати тепла організмом, що може призвести до захворювань. Крім того, фізико-хімічний склад повітря у навчальних приміщеннях постійно змінюється протягом дня через виділення продуктів дихання людей, що призводить до змін у рівні іонів та наявності важких частинок у повітрі. Це може спричинити погіршення працездатності (втоми, головних болів, зниження концентрації) та стану здоров'я (збільшення пульсу, зміни артеріального тиску, подразнення слизових оболонок, кашель і т.д.) як учнів, так і вчителів [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Основні принципи термомодернізації будівель, згідно вимог Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» полягають у підвищенні термічного опору огорожуючих конструкцій будівель, що значно підвищує їх щільність та відповідно мінімізує природню інфільтрацію повітря. Наскрізне провітрювання приміщень впродовж 5-10 хвилинної перерви зменшує вміст діоксиду вуглецю (CO₂) на 33-50 %, однак така концентрація не відповідає рекомендованим значенням в 1000 ppm [2].

Експериментальні дослідження параметрів теплового комфорту підтвердили [4], що у більшості навчальних закладів системи вентиляції перебувають у неробочому стані або відсутні взагалі, а нормативні показники мікроклімату приміщень не відповідають нормативним [2]. Відновлення централізованих вентиляційних систем ускладнене частковим демонтажем систем припливно-витяжних установок [5, 6]. Для забезпечення мінімально допустимого рівня теплового комфорту часто використовують локальні вентиляційні установки. Проте, існуючі локальні рекупераційні вентиляційні установки, хоча й дозволяють покращити параметри мікроклімату приміщень, однак мають перелік недоліків, зокрема зростання шумового фону, наявність холодних

протягів у місцях їх встановлення тощо, що унеможлиблює їх використання в дитячих навчальних закладах.

Питання забезпечення оптимального мікроклімату приміщень навчальних закладів розглянуто в роботах [5-9], але у більшості випадків увага присвячена енергоощадним режимам роботи систем вентиляції [5, 6], або розробленню систем вентиляції з природним спонуканням [7], які не завжди можуть забезпечити розрахунковий повітрообмін в зимовий період року. Потенціал природної вентиляції для забезпечення якісного складу повітря в приміщеннях навчальних закладах США за періодичної роботи механічних систем вентиляції розглянуто в [8]. Проблеми забезпечення необхідних умов теплового комфорту та прийнятної якості повітря для навчально-спортивних закладів шляхом імітаційного моделювання в середовищі COMIS досліджено в [9], доведена необхідність застосування примусової вентиляції. В роботах [5-10] й констатується сам факт такої проблеми, єдиного ефективного рішення не запропоновано. А отже, подальший пошук можливостей створення комфортного та безпечного повітряного середовища навчальних приміщень є пріоритетним завданням системи охорони здоров'я та екології.

Постановка завдання. Метою є розроблення автоматичної системи локальної рекуперації повітря для забезпечення теплового комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень навчальних закладів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– створити комп'ютерну імітаційну модель керування мікрокліматом за допомогою САК, що містять канали керування за температурою та концентрацією діоксиду вуглецю;

– визначити ефект від застосування розробленого алгоритму автоматичного керування установками локальної рекуперації шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу. До параметрів мікроклімату належать: температура повітря, відносна вологість приміщень, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового випромінювання і температура поверхні. Межами допустимих зон в приміщеннях навчальних закладів є повітря з відносною вологістю $\varphi \in (30...70)\%$ за температури $t \in (16...24)^\circ\text{C}$ та вмістом $\text{CO}_2 \in (1000...1500)$ ppm.

Одним із шляхів підвищення ефективності роботи системи локальної рекуперації повітря, а саме підтримання нормативних вимог до теплового комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень дитячих навчальних закладів є створення оптимальних параметрів мікроклімату за рахунок удосконалення систем автоматичного керування пристроями локальної рекуперації.

На рис.1 зображена узагальнена структурна схема системи автоматичного керування мікрокліматом в приміщенні навчального закладу з установками локальної рекуперації повітря.

На рис. 1: $t_{\text{зовн}}$, $C_{\text{зовн}}$ – значення температури та концентрації діоксиду вуглецю повітря, що подаються, як збурення на об'єкт; $t'_{\text{зовн}}$, $C'_{\text{зовн}}$, $t'_{\text{вн}}$, $C'_{\text{вн}}$ – виміряні значення температури та концентрації діоксиду вуглецю зовнішнього та внутрішнього повітря; $K_{\text{опт}}$ – вектор оптимальних значень, що визначений системою автоматичного керування, $W_{\text{опт}}$ – вектор керуючих впливів на продуктивність системи локальної рекуперації (об'єкт керування).

Модель об'єкту керування мікрокліматом в приміщенні складається з двох незалежних каналів – температури та концентрації діоксиду вуглецю. Для каналу контролю температури залежність внутрішньої температури в приміщенні $t_{\text{вн}}$ від температури зовнішнього повітря та масообмін повітря у приміщенні знаходиться з балансу теплової потужності:

$$Q_{\text{прим}} = Q_{\text{дж}} - Q_{\text{вих}} + Q_{\text{вх}}, \tag{1}$$

де $Q_{\text{прим}}$ – теплова енергія приміщення, Вт;
 $Q_{\text{дж}}$ – теплова енергія, що надходить від внутрішніх джерел (опалювальні прилади, люди), Вт;
 $Q_{\text{вих}}$ – теплова енергія, що витрачається з вихідним повітрям;
 $Q_{\text{вх}}$ – теплова енергія, що надходить до приміщення з вхідним повітрям.

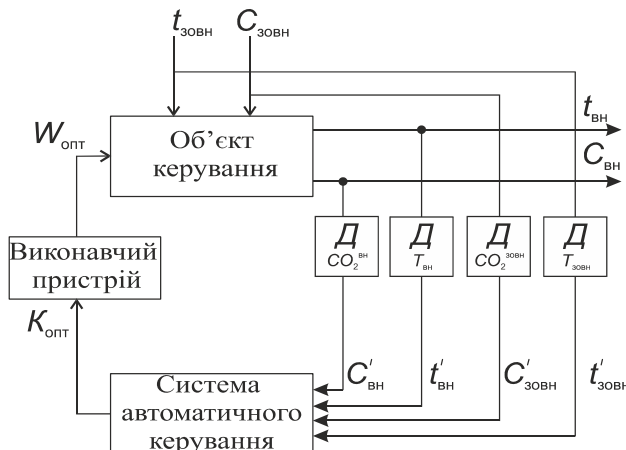


Рисунок 1 – Структурна схема САК мікрокліматом в приміщенні навчального закладу
 Джерело: розроблено авторами

Баланс теплової потужності у диференціальній формі:

$$m_{\text{пов}} c_{\text{пов}} \frac{dt}{d\tau} = Q_{\text{дж}} - m_{\text{вих}} c_{\text{пов}} t_{\text{вн}} + m_{\text{вх}} c_{\text{пов}} t_{\text{зовн}}, \tag{2}$$

де τ – час, с; $m_{\text{пов}}$ – маса повітря в приміщенні, кг;
 $c_{\text{пов}}$ – питома теплоємність повітря, Вт/кг·°С;
 $m_{\text{вих}}$ – маса витяжного повітря, кг;
 $m_{\text{вх}}$ – маса припливного повітря, кг;
 $t_{\text{вн}}$ – температура повітря всередині приміщення, °С;
 $t_{\text{зовн}}$ – температура припливного повітря до приміщення, °С.

Проведемо алгебраїчні перетворення виразу (1), приймаючи, що $m_{\text{вих}} = m_{\text{вх}} = m_{\text{вент}}$:

$$m_{\text{пов}} c_{\text{пов}} \frac{dt}{d\tau} = Q_{\text{дж}} - m_{\text{вент}} c_{\text{пов}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}), \tag{3}$$

звідки:

$$\begin{aligned} \frac{dt}{d\tau} &= \frac{Q_{\text{дж}} - m_{\text{вент}} c_{\text{пов}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}})}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} = \frac{dt}{d\tau} = \frac{Q_{\text{дж}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} - \frac{m_{\text{вент}} c_{\text{пов}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} t_{\text{вн}} + \frac{m_{\text{вент}} c_{\text{пов}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} t_{\text{зовн}} = \\ &= \frac{dt}{d\tau} = \frac{Q_{\text{дж}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} - \frac{m_{\text{вент}}}{m_{\text{пов}}} t_{\text{вн}} + \frac{m_{\text{вент}}}{m_{\text{пов}}} t_{\text{зовн}}. \end{aligned}$$

Зробивши деякі алгебраїчні перетворення отримаємо кінцевий частковий розв'язок рівняння (2):

$$t(\tau) = t_{\text{вн}} \cdot e^{-\frac{m_{\text{вент}}}{m_{\text{пов}}} \tau} + \left(1 - e^{-K_v \tau}\right) \left(\frac{Q_{\text{дж}}}{c_{\text{пов}} m_{\text{вент}}} + t_{\text{зовн}}\right), \tag{4}$$

де K_v – кратність повітрообміну в приміщенні.

Розв’язок рівняння балансу концентрації діоксиду вуглецю для навчального приміщення:

$$C_{CO_2}(\tau) = C_{зОВН} \cdot e^{-\frac{V_{вент}}{V_{пов}}} + \left(1 - e^{-\frac{V_{вент}}{V_{пов}}}\right) \left(C_{зОВН} + \frac{n \cdot C_p}{V_{вих}}\right), \tag{5}$$

де n – кількість осіб, що знаходяться у приміщенні;
 C_p – кількість діоксиду вуглецю, що надходить до повітря приміщення від учнів, мг.

Забезпечення зниження рівня теплового комфорту та підтримання мінімальної концентрації діоксиду вуглецю виконують шляхом автоматичного керування повітряним потоком установками локальної рекуперації. Для врахування такого впливу задачу керування установками локальної рекуперації, що враховують рівень комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень краще представити, як задачу багатокритеріальної оптимізації [14]. Постановка такої задачі має наступний вигляд:

$$\begin{cases} Q_1(K_v) = -T_{вн}(K_v) \rightarrow \min; \\ Q_2(K_v) = C_{вн}(K_v) \rightarrow \min; \\ K_v \in [K_{v.min} \dots K_{v.max}], \end{cases} \tag{6}$$

де Q_1, Q_2 – критерії оптимізації;
 K_v – кратність повітрообміну в приміщенні за рахунок роботи локальних рекуператорів;
 $[K_{v.min} \dots K_{v.max}]$ – область допустимих значень кратності повітря K_v ;
 $T_{вн}(K_v)$ – значення усталеного відхилення внутрішньої температури приміщення за рахунок припливного повітря від пристроїв локальної рекуперації.

Розв’язок задачі багатокритеріальної оптимізації вигляду (6) отримаємо із застосуванням методу наближення до утопічної точки в просторі критеріїв [12].

Узагальнена структурна схема даної комп’ютерної імітаційної моделі САК наведена на рис. 2.

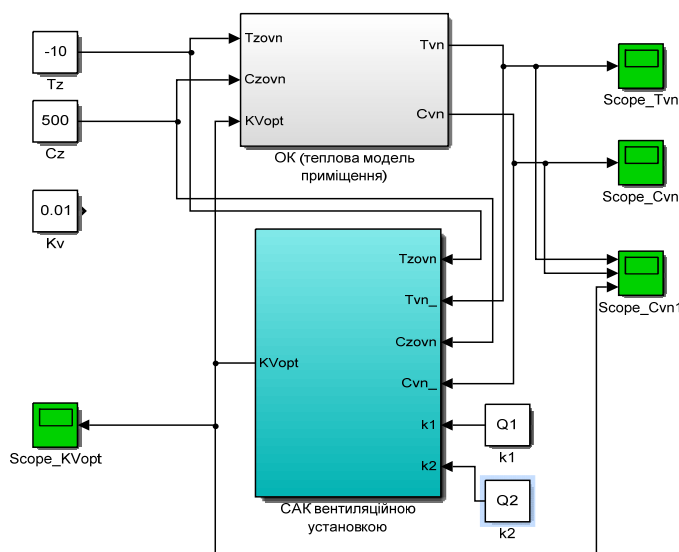


Рисунок 2 – Узагальнена комп’ютерна модель САК установкою локальної припливно-витяжної вентиляції

Джерело: розроблено авторами

Результати комп'ютерного імітаційного моделювання наведені на рис. 3 – 5 у вигляді графіків.

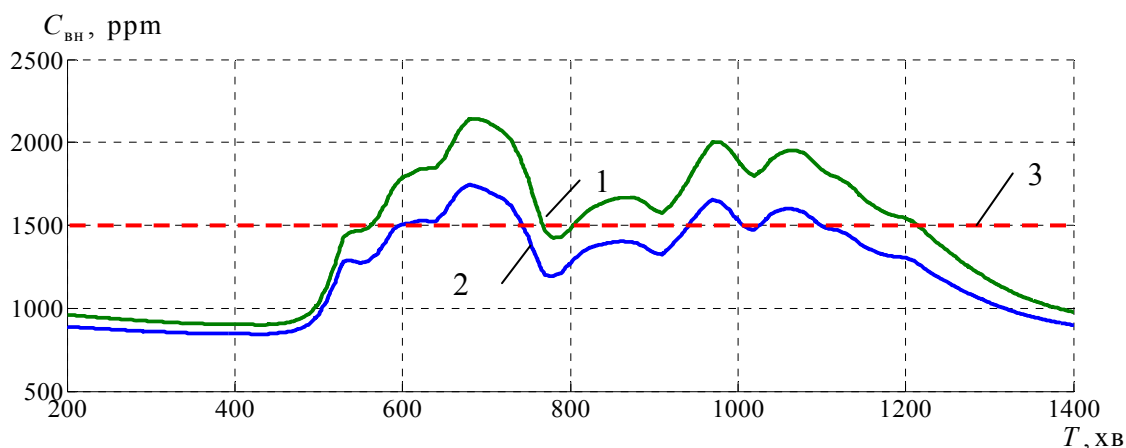


Рисунок 3 – Графік концентрації CO₂ для базової (1), розробленої моделі (2) САК параметрами мікроклімату та максимально допустимий рівень концентрації CO₂ всередині приміщення (3)

Джерело: розроблено авторами

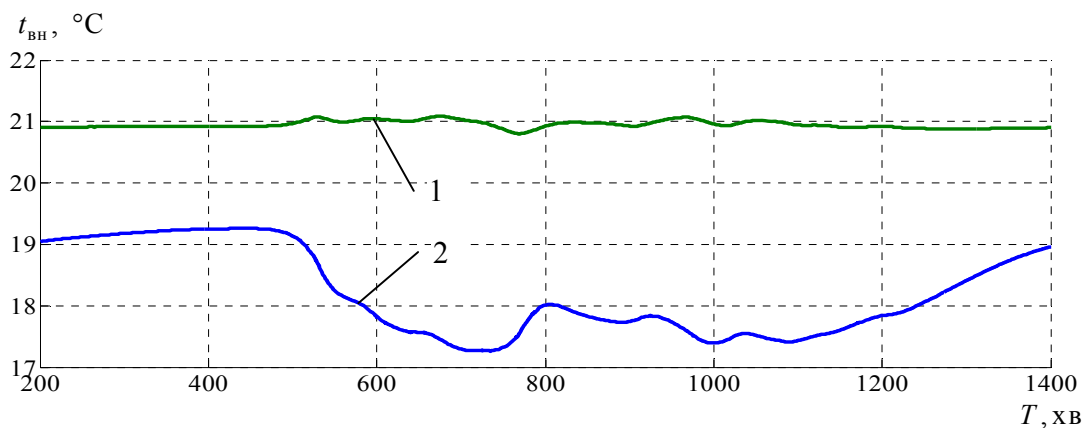


Рисунок 4 – Графік температури всередині приміщення для базової (1) та розробленої моделі (2) САК параметрами мікроклімату

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рис. 3, тривалість зони з перевищенням максимально допустимого рівня концентрації CO₂ всередині приміщення у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 567 хв меншою, ніж для базової моделі. Крім того, як видно з рис. 4 розроблена система, також обмежує відхилення температури в приміщенні, що дозволяє підтримувати допустимі значення теплового комфорту згідно вимог [4].

Висновки:

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що задачу керування установками локальної рекуперації, що враховують рівень комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень, краще представити, як задачу багатокритеріальної оптимізації, а її розв'язок отримати із застосуванням методу наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

2. Проведений аналіз ефекту від застосування запропонованого підходу підтвердив переваги запропонованої системи шляхом зменшення тривалості зони з перевищенням максимально допустимого рівня концентрації CO₂ на 49,5 % та зменшення значення концентрації CO₂ на 13,1% за умови підтримання температури в гранично допустимих межах.

Список літератури

1. Сукач С.В., Козловська Т.Ф. Оцінювання впливу мікроклімату навчальних приміщень на розумову працездатність студентів . *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. Вип. 31. С. 105-112.
2. Waheed A., Tariq M. The Impact of Renewable Energy on Carbon Dioxide Emissions: An Empirical Analysis of Selected South Asian Countries . *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. 9(4). Pp. 527-534. DOI: 10.15421/2019_785.
3. Івасенко В.М., Ганчев Б.С. Вимірювання діоксиду вуглецю в приміщенні громадських, житлових та офісних будівель . *ScienceRise : Scientific Journal*. 2018. №7(48). С. 38-41.
4. ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 57 с. (Державні будівельні норми України).
5. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings / Cao G., Awbi H., Yao R., Fan Y., Sirén K., Kosonen R., Zhang J. (Jensen) . *Building and Environment*. 2014. Vol. 73. P. 171–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009>
6. Chenari B., Dias Carrilho J., Gameiro da Silva M. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1426–1447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074>
7. Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter / Lei Z., Liu C., Wang L., Li N. *Building and Environment*. 2017. Vol. 125. P. 240–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051>
8. Cheng Z., Li L., Bahnfleth W. P. Natural ventilation potential for gymnasias – Case study of ventilation and comfort in a multisport facility in northeastern United States . *Building and Environment*. 2016. Vol. 108. P. 85–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.019>
9. Experimental and theoretical investigation of air exchange rate of an indoor aquatic center / Panaras G., Markogiannaki M., Tolis E. I., Sakellaris Y., Bartzis J. G. . *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 39. P. 126–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.012>
10. M. He, J. Zheng, Z. Liu. Study on indoor thermal environment under winter air-conditioning condition in one university students' dormitory in Chongqing . *Refrigeration and Air-conditioning*. 2014. № 14 P. 89–93.
11. Авраменко М.М., Сукач С.В., Кобилянський М.А. Підтримка параметрів мікроклімату в нормативних межах як засіб створення комфортних умов праці . *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. 2010. Вип. 4/2010 (12). С. 94–99.
12. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. у-ту* . 2012. Вип. 25, Ч. 1. С. 350-360.

References

1. Sukach, S.V. & Kozlovska, T.F. (2016). Otsiniuvannia vplyvu mikroklimatu navchalnykh prymishchen na rozumovu pratsezdattnist studentiv [Evaluation of the influence of the microclimate of educational premises on the mental capacity of students]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Problems of labor protection in Ukraine, Issue 31*, 105-112 [in Ukrainian].
2. Waheed, A. & Tariq, M. (2019). The Impact of Renewable Energy on Carbon Dioxide Emissions: An Empirical Analysis of Selected South Asian Countries . *Ukrainian Journal of Ecology*, 9(4), pp. 527-534. DOI: 10.15421/2019_785 [in English].
3. Ivasenko, V.M. & Hanchev, B.S. (2018). Vymiriuvannia dioksydu vuhletsiu v prymishchenni hromadskykh, zhytlovykh ta ofisnykh budivel [Measurement of carbon dioxide in the premises of public, residential and office buildings]. *Scientific Journal «ScienceRise» –* , 7(48), 38-41 [in Ukrainian].
4. Budinki i sporudi. Zakladi osviti. (2018). *DBN V.2.2-3:2018*. Київ: Ministerstvo regional'nogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukraïni (Derzhavni budivel'ni normi Ukraïni) [in Ukrainian].
5. Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R. & Zhang, J. (Jensen). (2014). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings . *Building and Environment*, Vol. 73, P. 171–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009> [in English].
6. Chenari, B., Dias Carrilho, J. & Gameiro da Silva, M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, P. 1426–1447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074> [in English].

7. Lei Z., Liu C., Wang L. & Li N. (2017). Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter . *Building and Environment, Vol. 125*, P. 240–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051> [in English].
8. Cheng, Z., Li, L. & Bahnfleth, W.P. (2016). Natural ventilation potential for gymnasia – Case study of ventilation and comfort in a multisport facility in northeastern United States . *Building and Environment, Vol. 108*, P. 85–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.019> [in English].
9. Panaras, G., Markogiannaki, M., Tolis, E.I., Sakellaris, Y. & Bartzis, J.G. (2018). Experimental and theoretical investigation of air exchange rate of an indoor aquatic center . *Sustainable Cities and Society, Vol. 39*, P. 126–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.012> [in English].
10. He, M., Zheng, J. & Liu, Z. (2014). Study on indoor thermal environment under winter air-conditioning condition in one university students' dormitory in Chongqing . *Refrigeration and Air-conditioning, 14*, P. 89–93 [in English].
11. Avramenko, M.M., Sukach, S.V. & Kobylanskyi, M.A. (2010). Pidtrymka parametriv mikroklimatu v normatyvnykh mezhakh yak zasib stvorennia komfortnykh umov pratsi [Maintaining microclimate parameters within regulatory limits as a means of creating comfortable working conditions]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy: shchokvartalnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal – Electromechanical and energy-saving systems: a quarterly scientific and industrial journal, Vyp. 4(12)*, 94–99 [in Ukrainian].
12. Zinzura, V.V. (2012). Metody rozviazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehuliuвання napruhy v elektrychnykh merezhakh [Methods of solving the problem of multi-criteria optimization of voltage regulation in electric networks.] . *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia : zb. nauk. prats KNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation : Coll. Works of KNTU, Issue 25, part. 1*, 350-360 [in Ukrainian].

Ivan Savelenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kateryna Petrova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kotysh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Optimization of Microclimate Parameters in Educational Institutions with air Local Recovery Systems

The aim is to develop an automatic local air recovery system to ensure thermal comfort and the normative composition of the air environment in educational institution premises. Improving the efficiency of local air recovery systems while maintaining optimal microclimate parameters is possible through the enhancement of automatic control systems for local recovery devices.

An automatic air local recovery control system has been developed, which guarantees optimal microclimate parameters in educational institution premises. Computer simulation modeling has been applied to control the microclimate system based on temperature and CO₂ concentration.

The advantages of the proposed system have been identified, which reduced the duration of exceeding the maximum allowable level of CO₂ concentration by 49.5% and decreased the CO₂ concentration by 13.1% within the specified temperature limits.

local air recovery, microclimate, automatic control system, air quality

Одержано (Received) 11.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.771.2:620.17

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.130-138](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.130-138)**Т.В. Гайкова**, доц., канд. техн. наук, **О.А. Мурашко**, асп.*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,**м. Кременчук, Україна**e-mail: murashkostudy@gmail.com*

Сприяння впровадженню електромобілів як науково-технічна інновація в галузі автомобільного транспорту

У статті розглянуто питання перспектив розвитку і поширення застосування електромобілів в Україні. Проведено аналіз та зіставлення даних статистичних звітів і аналітичних матеріалів, що характеризують стан ринків електромобілів у світі.

автомобільний транспорт, інновації, електромобілі, технології майбутнього, екологічна безпека

Постановка проблеми. На сьогоднішній день в галузі автомобільного транспорту значна увага науковців спрямована на підвищення рівня екологічної безпеки та впровадження новітніх технологій. Тому широкого розповсюдження в Україні та світі набули електромобілі. Цей вид транспорту дає можливість власникам повністю відмовитись від традиційних видів палива та заощадити власні кошти, а державі локалізувати сферу регулювання рівня екологічної та техногенної безпеки у місцях розташування електростанцій. Проте, введення в масову експлуатацію електромобіля і його підтримка на вітчизняному ринку є досить суперечливим питанням як з точки зору економії ресурсів і, відповідно, енергетичної незалежності, так і з точки зору екології. Основними перешкодами на шляху більш широкого впровадження електромобілів є їх вартість, нерозвинена інфраструктура підзарядки, сервісу та ремонту, а також недостатня кількість фахівців з обслуговування та ремонту.

Тому необхідно проаналізувати основні переваги та недоліки більш широкого впровадження електромобілів, а також думки автовласників та науковців щодо цього процесу в Україні. Крім того необхідно розглянути новітні технології, які також сприяють впровадженню електромобілів, зокрема ті, які стосуються нових рішень у системах гальмування та рекуперації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різним аспектам впровадження у автомобільній галузі електроприводу та інноваційних технологій присвячено велику кількість наукових праць українських та зарубіжних дослідників. Серед вчених, що досліджували електромобілі та перспективи їх застосування, Горова К. О., Зубенко Д. Ю., Будько В. І., Гуртовий М. Ю., Сапожник Д. І., Леонтович А. О., Гайкова Т. В. [1-8]. Серед зарубіжних науковців електромобілі досліджували Martins H., Wicki M., Athanassopoulou L. [9-11].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження наслідків реалізації концепції ринкової орієнтації на українському ринку легкових електромобілів та визначення впливу інновацій на її розвиток. Надання оцінки розвитку науково-

технічних складових щодо застосування нових конструктивних рішень в галузі автомобільного транспорту, які сприяють більш широкому впровадженню електромобілів.

Виклад основного матеріалу. Станом на 1 січня 2023 року, загальна кількість легкових електромобілів, зареєстрованих в Україні, становить 46 830 автівок. За 2022 рік сервісними центрами МВС вперше було зареєстровано на території нашої держави 13 321 легкових електрокарів. В 2021 році ця цифра становила 8 541 одиницю. [12]. З 2016 року зростання кількості електромобілів порівняно з попередніми періодами перевищило 400 %, а протягом наступних років стало ще більшим. За темпами зростання кількості електромобілів Україна стала європейським лідером у 2016 році, а у 2017 році зайняла 5-те місце у світі. Протягом 2018 року кількість зареєстрованих електромобілів сягнула майже 5000 тис. [13]. Станом на 2021-й кількість автомобілів в Україні складала 10,2 млн. одиниць. З яких легкових 8,8 млн. Протягом 2022-го українські номери вперше отримали ще близько 0,5 млн машин всіх типів, тобто на сьогодні легкових авто в країні аж ніяк не менше 9 мільйонів. [14]. Таким чином, частка електромобілів у загальній масі автотранспорту в нашій країні становить близько 0,5%.

Головним драйвером зростання кількості електромобілів стала економічність та вищий рівень екологічної безпеки у порівнянні з дизельними та бензиновими автомобілями. Такий успіх не пройшов повз автодилерів. Три бренди з топ-10 найбільш продаваних: BMW, Hyundai і Renault – вивели на ринок свої електромобілі.

Україна визначає пріоритетом перехід на електричний автомобільний транспорт до 1 січня 2030 року. У 2017 році Міністерство інфраструктури України розробило 15 річну стратегію розвитку електротранспорту в Україні. Вона запланована у кілька етапів. Один із основних етапів – це скасування ПДВ на ввезення електромобілів в Україну (як відомо, в Україні електромобілі звільнені від ПДВ та ввізного мита як мінімум до кінця 2025 року). У 2020 році набрав чинності Закон України про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення доступу до інфраструктури зарядних станцій для електромобілів, який, серед іншого, запровадив «зелені» номерні знаки та використання в них чистої латиниці. Такі номерні знаки почали видавати в Україні восени 2020 року. Паливна криза та подальше зростання цін призвели до стрімкого росту попиту на електричні моделі. Якщо рахувати з «гібридами», то вже зараз в Україні налічується понад 100 тис. електрифікованих легкових авто.

Сьогодні стримуючим чинником динамічнішого розвитку ринку електромобілів є нерозвинена мережа швидкісних зарядних станцій. Справа в тому, що людині не потрібні зарядні станції протягом дня. У середньому автомобіліст проїжджає на день 40-50 км. Наприклад, одного заряду Nissan Leaf вистачає на 150 км. Електромобіль можна зарядити вдома від розетки за ніч. Єдиний чинник, навіщо необхідні швидкісні зарядні станції – це подолання великих дистанцій, наприклад, між містами. Тому на основних магістралях країни потрібні швидкісні зарядні станції. [15].

За даними Міністерства інфраструктури України, станом на 1 листопада 2021 року українська зарядна мережа для електромобілів налічувала 3244 станції з 7661 терміналом. З них швидкісних (потужність понад 22 кВт) – 1835 од., тобто 24%. Інші 5826 од. (76%) – звичайні термінали потужністю до 22 кВт. Наприкінці вересня 2022 року «Енергоатом» анонсував створення мережі зі 120 швидких зарядних станцій для електромобілів за два роки – 40 великої потужності (160+ кВт) та ще 80 середньої потужності (60+ кВт) в обласних центрах та на основних автомагістралях України [16].

За даними Міністерства інфраструктури, на даний момент в Україні працюють 6 провайдерів електромобільних послуг та понад 15 операторів зарядних станцій. Зокрема послуги зарядки електромобілів почала надавати державна компанія

«Нафтогаз» (зарядки під брендом WeEnergy). Також з'явилися перші зарядні станції для китайського стандарту GB/T [17].

У 2015 році на частку транспортної компанії DHL Express в Україні припало 24% негативного ефекту, пов'язаного з викидом вуглекислих газів у навколишнє середовище. Цей показник сам за себе говорить про те, яке навантаження йде тільки від однієї індустрії. Якщо взяти лише групу компанії Deutsche Post DHL – 61 мільйон відправлень на день. Якщо взяти світом – це сотні мільйонів, ближче до мільярдів щоденних відправлень, які доставляються авіа та автомобільним транспортом. На авіатранспорт в у компанії припадає практично 70% негативного ефекту від викиду вуглекислого газу в довкілля, а далі йде автомобільний транспорт. Першу програму DHL Express запустили багато років тому. І завдання було поставлено до 2020 року скоротити викид CO₂ у порівнянні з 2007 роком на 30%. І це завдання було виконане вже у 2016 році. На сьогоднішній день компанія Deutsche Post DHL поставила перед собою дуже амбітну мету – до 2050 року довести цей показник до нуля. Завдання сьогодні – це заміна автомобільного транспорту. На сьогоднішній день поставлена мета – до 2025 року замінити існуючий транспорт на екологічно чистий та довести цей показник до 70%. У самій компанії Deutsche Post у Німеччині було навіть куплено власне виробництво на базі стартапу. Ці машини відомі під брендом Streetscooter. Останнім часом до парку компанії додано понад тисячу автомобілів. І загальна кількість електромобілів у компанії глобально вже доведена до 13 тисяч.

Якщо брати Україну, то тут насамперед має бути готова інфраструктура. DHL Express є частиною глобальної програми захисту навколишнього середовища. Дана програма називається Go Green. Як зазначає Вадим Сидорук, генеральний директор DHL Express в Україні: «Переходячи на електромобілі, ми повинні бути впевнені, що це в жодному разі не позначиться негативно на сервісі, який отримують наші клієнти. А при цьому ми робитимемо свій внесок у захист навколишнього середовища. Для нас також важлива кількість заправок. Наші кур'єри долають 70-150 км на день. Якби на сьогоднішній день стояло питання про заміну електротранспорту, то це були б центральні райони Києва, де обмежені відстані та є можливість заправлятися. Чим далі ми відходимо від центру, тим ці питання стають дедалі гострішими.»

В АВТ Баварія (BMW) очікують дуже великого зростання продажів електромобілів на наступні роки. Оскільки Україна – один із ринків електротранспорту, що найбільш швидко розвиваються в Європі. На думку Олександра Тимофєєва, генерального директора АВТ Баварія (BMW), є кілька факторів такого попиту. Перший чинник – це дешеве паливо. Електрична зарядка набагато дешевша, ніж бензин або дизель. Другий аспект – в Україні зростає кількість громадян, які замислюються про екологічні наслідки.

Безперечно, велику роль відіграє те, що електроавтомобілі практично не вимагають сервісу. Електричний автомобіль не має мастила, гальмує електрикою, при цьому заряджаючи батарею. Він має лише один фільтр, який фільтрує повітря у салоні. Сьогодні в Європі продаються мільйони електрокарів, за десять років це значно змінить структуру автосервісу.

Технології дуже швидко йдуть уперед. Зростає інфраструктура заряджання. Кожен виробник сьогодні декларує більший пробіг між зарядками. Час заряджання на дорозі зменшується з кожним роком. Насамперед державі не потрібно прагнути заробити на цих автомобілях. Адже ця інновація дозволить нам заощадити енергоресурси, яких катастрофічно не вистачає в Україні.

За даними Європейської асоціації автовиробників, автомобільна промисловість витрачає найбільше коштів на дослідження та розробки порівняно з іншими галузями європейської промисловості. Метою постійного вдосконалення технологій та нових

відкриттів є зміна образу транспорту на більш екологічний, а його основними елементами мають стати легкі, екологічні та інтелектуальні автомобілі майбутнього.

Автомобільна промисловість швидко розвивається та є найбільш інноваційною галуззю європейської економіки. Серед десяти ключових галузей промисловості вона несе майже 30% світових витрат на дослідження та розробки, залишаючи далеко позаду другий в списку сектор фармацевтики та біотехнологій. У 2018 році автомобільна галузь направила на ці цілі майже 61 млн. євро, тоді як фармацевтична – 39,9 млн. євро. Європейський автомобільний сектор суттєво випереджає Японію з майже вдвічі меншими масштабами та США, чиї інвестиції у дослідження та розробки у сфері «автомобілі та автозапчастини» перебувають на рівні близько 18 млрд євро. Кризи, пов'язані з обмеженням поставок та необхідністю швидкої адаптації до все більш жорстких норм викидів в атмосферу в країнах Європейського Союзу, безумовно, вплинуть на майбутнє цього сектора, проте є всі підстави вважати, що він стоїть на міцному фундаменті.

Може здатися, що сферою діяльності європейської автомобільної промисловості є електромобільність, а більша частина інформації про інтелектуальні, автономні автомобілі надходить із США, проте у 2018 році найбільша кількість патентних заявок у галузі технології автономних автомобілів надійшло саме з Європи. Із загальної кількості всіх патентів у світі 33,3% припадає на Європу, яка випереджає США з показником 30,1%. Третє місце посідає Японія, а четверте – Південна Корея, їхня частка у світових патентних заявках склала 11,5% і 10,5% відповідно.

Це означає, що електрифікація транспортних засобів на європейському континенті тісно пов'язана з розвитком все більш інтелектуальних технологій, які мають зробити керування більш комфортним, безпечним та очікуваним. Це пов'язано, в тому числі, і з європейськими нормами, що все ще змінюються, які, крім чергових жорстких обмежень на викиди шкідливих речовин, впроваджують, крім іншого, все більше рішень активної безпеки в стандартне обладнання нових автомобілів. Кризи, спричинені пандемією, не тільки не порушили, а й посилили цей напрямок розвитку. Про це свідчать, зокрема, дані щодо продажу за перше півріччя 2020 року. Одночасно з падінням продажів на автомобілі з двигуном внутрішнього згорання на цілих 38%, продаж електромобілів збільшився на 20%. Цій тенденції сприяють дії урядів деяких європейських країн, які використовують фінансові стимули для придбання цього виду автомобілів, тим самим формуючи споживчий попит.

Заміна автомобілів з двигуном внутрішнього згорання на повністю електричні та автономні вимагає подальшого розвитку не лише технологій приведення в рух та зарядки автомобілів майбутнього з низьким рівнем викидів, а й удосконалення всієї їхньої конструкції. Крім ще більш ефективних силових установок, інтелектуальної електроніки, що дозволяє ефективніше використовувати енергію, або зменшити об'єм батарей, вони повинні мати легшу і в той же час ще аеродинамічнішу форму. Тому дизайнери та конструктори в автомобільній галузі продовжують шукати нові матеріали та інноваційні технології виробництва, які дозволять, з одного боку, знизити вагу автомобілів, а з іншого – забезпечити оптимальну маневреність та міцність конструкції, отже, безпеку та комфорт їх використання. У той же час, сучасні автомобілі повинні вироблятися все більшою мірою з матеріалів, що переробляються, як того вимагає європейське законодавство. У цьому контексті однією з найбільших інновацій в автомобільній галузі став надлегкий спінений поліпропілен ЕРР, який сьогодні знаходить широке застосування в конструкції електромобілів.

Незважаючи на те, що спінений поліпропілен ЕРР відносно нещодавно використовується для виробництва автомобільних деталей, він знайшов багато різних застосувань в автомобільній промисловості. Ще у вісімдесяти роки він

використовувався для виробництва елементів, що амортизують, в бамперах, надалі, завдяки його численним корисним властивостям, він замінив традиційні пінопласти в багатьох областях виробництва автомобілів. Насамперед він набагато легший, легко формується і на 100% придатний для вторинної переробки, що повністю відповідає сучасним вимогам автовиробників. Економічний процес формування EPP та сучасні технології комп'ютерного 3D-моделювання роблять його ідеальним матеріалом, що дозволяє виробляти унікальні, інноваційні рішення.

Крім відмінних теплоізоляційних властивостей та амортизації, він забезпечує захист чутливої електроніки від перенапруги і в той же час не схильний до постійної деформації. Все це призвело до того, що сьогодні він використовується не тільки для виробництва основних елементів оснащення автомобіля, таких як сидіння, підголівники або наповнювачі дверей, але і елементів, що входять до складу акумуляторних батарей для електромобілів. Виготовлені з нього сепаратори, ізолятори високої пробивної напруги або елементи кріплення чудово захищають чутливу електроніку від механічних та електричних факторів, забезпечуючи безпечну та безпроблемну експлуатацію сучасних електромобілів.

У 2019 році почався бум продажів електромобілів у всьому світі, і ця тенденція змінює вимоги до фрикційних матеріалів та компонентів гальмівної системи. Збільшення продажів електромобілів та автомобілів з гібридними установками становило 92% (або 765 000 одиниць, проданих на 41 різних ринках у першому півріччі 2019 року). Відбувається не що інше, як електрореволюція, яка потребує технічних змін. Тому компоненти гальмівної системи також змінюватимуться.

При розробці компонентів гальмівної системи для електромобілів необхідно враховувати нові вимоги: від відсутності шуму при роботі двигуна та рекуперативного гальмування до повної допустимої маси транспортного засобу і потужності прискорення.

Аналізуючи рекуперативну гальмівну систему можна стверджувати, що метод гальмування дозволяє транспортному засобу виступати як генератор, перетворюючи рух автомобіля в електричну енергію. Електричні транспортні засоби досягають гальмування, керуючи своїми двигунами в режимі реверсу, витягуючи енергію для зберігання та підзарядки електричних батарей. Виникаюче гальмівне зусилля допомагає гальмівним колодкам долати інерцію автомобіля та сприяє гальмуванню.

У цьому випадку гальмівні колодки виступають як резервний метод гальмування, коли рекуперативна гальмівна система не забезпечує достатньо енергії. Проте вони вступають у роботу під час інтенсивного аварійного гальмування. Це дуже відрізняється від традиційної гальмівної системи, де гальмівні колодки входять у контакт із гальмівними дисками, щоб уповільнити або повністю зупинити автомобіль. Тертя в гальмівній системі призводить до виділення тепла від перетворення кінетичної енергії автомобіля. Це тепло розсіюється і залишається невикористаним.

Коли акумулятор електромобіля повністю заряджений, система не може скористатися перевагами рекуперативного гальмування. Це означає, що гальма повинні виконувати всю роботу без будь-якої підтримки з боку двигуна. Для поглинання цієї напруги необхідна покращена гальмівна рідина з високими «сухою» та «вологою» точками кипіння. Коли акумулятор не повністю заряджений, фрикційні гальма виконують менше роботи, що уповільнює знос.

У міру вирішення питань доступності, інфраструктури та інвестицій перехід на електромобілі відкриває нові можливості. Це буде необхідно для досягнення жорстких цільових показників викидів, встановлених на найближчі 5-10 років. Нові цільові показники викидів, встановлені для легкових автомобілів та легких комерційних транспортних засобів у ЄС на період після 2020 року, вимагатимуть скорочення

викидів двоокису вуглецю на 37,5% для нових автомобілів та скорочення викидів на 31% для легких комерційних автомобілів, таких як фургони, до 2030 року.

Для подальшого стимулювання досягнення цих цілей буде введено нейтральний у технологічному відношенні стимул для транспортних засобів з нульовим та низьким рівнем викидів, щоб дати ринку чіткий сигнал для інвестицій в екологічно чисті варіанти транспорту. Це стосується як транспортних засобів з нульовим рівнем викидів, так і транспортних засобів з низьким рівнем викидів, що не перевищує 50 г CO₂ на км.

Спосіб контролю та перевірки цих менших обсягів парникових газів полягатиме у впровадженні суворішої системи контролю за ринком для забезпечення точності офіційних процедур випробувань шляхом зіставлення їх із реальними ситуаціями. А також ступінь, у якому транспортні засоби, виставлені на ринок, відповідають випробуваним зразкам.

Іншим важливим чинником, який необхідно брати до уваги в майбутньому, будуть інші категорії викидів, які шкідливі для озонового шару, але не відносяться до вихлопних газів. Так, тверді частинки, що утворюються під час руху автомобіля, впливають на рівень екологічної безпеки. Продукти зношування гальм, шин, зчеплення, а також дорожнього покриття особливо інтенсивно утворюються в міських умовах і негативно впливають на рівень екологічної безпеки через високу частоту гальмування та високу інтенсивність руху. Такі інновації, як гальмівні колодки Ferodo за технологією ECO-Friction®, вже враховують ці майбутні зміни, передбачаючи зелену революцію.

На думку аналітиків Gartner, світовий ринок електромобілів чекає серйозна трансформація, обумовлена низкою чинників, включаючи геополітичну і макроекономічну обстановку, що склалася. Свої висновки експерти навели у звіті, опублікованому 9 березня 2023 року. Стрибок цін на електроенергію в Європі робить експлуатаційні витрати на транспортні засоби з живленням виключно від акумуляторів менш привабливими. Деякі країни, такі як Великобританія, Швейцарія і Австралія, починають вводити оподаткування електромобілів. Крім того, Китай припинив субсидування таких машин на початку 2023 року. Існують проблеми з розвитком глобальної зарядної інфраструктури, а якість обслуговування власників електрокарів бажає кращого. Негативний вплив на галузь також робить різке підвищення цін на сировину, зокрема, на літій та нікель. Все це призводить як до підвищення вартості власне електромобілів, так і збільшення витрат на їх обслуговування.

В результаті темпи зростання продажів електричних автомобілів можуть сповільнитися, а в деяких регіонах взагалі зійти нанівець. Аналітики наголошують, що через кілька років після початку пандемії COVID-19 автовиробники все ще не можуть спрогнозувати кінець нестачі напівпровідникових мікросхем. Крім того, учасники ринку продовжують відчувати труднощі із закупівлею матеріалів для ключових компонентів електромобілів, включаючи батареї.

З іншого боку, період спаду дасть автомобільним компаніям можливість збільшити свою частку шляхом впровадження передових IT-технологій. Наприклад, кілька великих автовиробників намагаються трансформуватися в технологічні компанії, але їхня корпоративна культура є серйозною перешкодою для здійснення таких планів.

Gartner очікує, що до 2026 року понад 50% електромобілів, що продаються у всьому світі, будуть поставлятися китайськими брендами. Станом на початок 2023-го понад 15 китайських компаній пропонували електричні моделі, причому багато які з них коштують набагато дешевше в порівнянні з автомобілями іноземних конкурентів. Крім того, китайські виробники демонструють вищі темпи зростання у відповідному сегменті, ніж такі великі та відомі корпорації, як General Motors, Volkswagen та Tesla. Китайські розробники мають великий потенціал зростання завдяки хорошему доступу

до основної сировини та виробничих потужностей з випуску акумуляторів. Тому експерти Gartner рекомендують ІТ-директорам підприємств автомобільної галузі, які сфокусували увагу на електромобілях, інтегрувати програмне забезпечення для планування ланцюжків поставок та забезпечення прозорості, щоб приймати більш ефективні бізнес-рішення та досягти стабільності виробництва.

За оцінками Gartner, до 2025 року технологічні гіганти володітимуть принаймні частиною компонентів операційних систем для 95% нових автомобілів. Більше того, такі компанії, як Foxconn, Huawei, Alibaba, Xiaomi, Tencent та Sony, візьмуть безпосередню участь у розробці, виробництві та продажу машин.

Висновки. Електромобілі дають можливість власникам повністю відмовитись від традиційних видів палива та заощадити власні кошти, а державі локалізувати сферу регулювання рівня екологічної та техногенної безпеки у місцях розташування електростанцій. Станом на 1 січня 2023 року, загальна кількість легкових електромобілів, зареєстрованих в Україні, становить 46 830 автівок, а частка електромобілів у загальній масі автотранспорту в нашій країні становить близько 0,5%. Якщо рахувати з «гібридами», то вже зараз в Україні налічується понад 100 тис. електрифікованих легкових авто. Головним драйвером зростання кількості електромобілів стала економічність та вищий рівень екологічної безпеки у порівнянні з дизельними та бензиновими автомобілями.

Україна визначає пріоритетом перехід на електричний автомобільний транспорт до 1 січня 2030 року. Як відомо, в Україні електромобілі звільнені від ПДВ та ввізного мита як мінімум до кінця 2025 року. У 2020 році набрав чинності Закон України про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо створення доступу до інфраструктури зарядних станцій для електромобілів. Сприяння впровадженню електромобілів став активний розвиток транспортної інфраструктури. На сьогодні українська зарядна мережа для електромобілів налічує 3244 станції з 7661 терміналом, з них швидкісних – 1835 од., тобто 24%, а 5826 од. (76%) – звичайні термінали потужністю до 22 кВт.

Основними перешкодами на шляху більш широкого впровадження електромобілів є їх вартість, нерозвинена інфраструктура підзарядки, сервісу та ремонту, а також недостатня кількість фахівців з обслуговування та ремонту.

Список літератури

1. Горова К.О., Горовий Д.А., Свіязов М.В., Шевердіна А.В. Визначення перспектив електромобілів на ринку України. *Проблеми і перспективи розвитку підприємництва*. 2017. № 2. С. 33-38.
2. Горова К.О., Шевердіна А.В. Актуальність застосування електромобілів в Україні. *Проблеми і перспективи розвитку підприємництва*. 2015. № 3(1). С. 105-107.
3. Зубенко Д.Ю., Коваленко А.В., Петренко О.М., Шавкун В.М., Олехно М.Ю. Розробка енергомеханічної установки для тяги електромобіля. *ScienceRise*. 2016. № 10(2). С. 6-15.
4. Будько В. І. Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 4(47). С. 32-41.
5. Гуртовий М.Ю., Попов С.В. Моделювання та оптимізація параметрів електромобілів з комбінованими режимами енергоживлення. *Молодий вчений*. 2016. № 5. С. 223-228
6. Сапожник, Д.І. Проблеми та перспективи розвитку ринку електромобілів в Україні. *Editorial board*. 2022. С.553.
7. Сапожник Д.І. Експлуатаційні та безпекові складові споживних властивостей електромобілів. *Editorial board*. 2022. С.38.
8. Леонтович А. О., Гайкова, Т. В. Дослідження роботи електровантажівок на контактних лініях при контейнерних перевезеннях. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем*. 2022. С.43.

9. Martins H., Henriques C. O., Figueira J. R., Silva C. S., Costa A. S. Assessing policy interventions to stimulate the transition of electric vehicle technology in the European Union. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. 101505.
10. Wicki M., Brückmann G., Quoss F., Bernauer T. What do we really know about the acceptance of battery electric vehicles?—Turns out, not much. *Transport Reviews*. 2023. 43(1), P. 62-87.
11. Athanasopoulou L., Bikas H., Papacharalampopoulos A., Stavropoulos P., Chryssolouris G. An industry 4.0 approach to electric vehicles. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2023. 36(2), P. 334-348.
12. Майбутнє за електромобілями – це очевидно і неминуче. *Регіональний сервісний центр ГСЦ МВС в Черкаській області*: веб-сайт. URL: <https://chk.hsc.gov.ua/2023/01/24/majbutnye-za-elektromobilyami-tse-ochevidno-i-neminuche/> (дата звернення: 26.03.2023).
13. Електромобілі. *Тиждень*: веб-сайт. URL: <http://week.dp.gov.ua/osvitnia-prohrama/pislya91/elektromobili> (дата звернення: 26.03.2023).
14. Скільки насправді машин в Україні: багато чи мало? *Auto 24*: веб-сайт. URL: https://auto.24tv.ua/skilky_naspravdi_mashyn_v_ukraini_bahato_chy_malo_n43694 (дата звернення: 26.03.2023).
15. Електромобільний рік. Чим приваблюють українців машини на електротязі. *NV Бізнес*: веб-сайт. URL: <https://biz.nv.ua/ukr/publications/elektromobilni-rik-chim-privabljujut-ukrajintsiv-mashini-na-elektrotjazii-1317134.html> (дата звернення: 27.03.2023).
16. Скільки легкових електромобілів в Україні? На початок 2023 року таких авто зареєстровано майже 47 тис. *ІТС*: веб-сайт. URL: <https://itc.ua/ua/novini/skilky-legkovyh-elektromobiliv-v-ukrayini-narochatok-2023-roku-takuh-avto-zareyestrovano-majzhe-47-tys/> (дата звернення: 27.03.2023).
17. В Україні вперше порахували кількість зарядних станцій для електромобілів: чотири машини на одну заправку. *AutoGeek*: веб-сайт. URL: <https://autogeek.com.ua/zarydni-stancii/> (дата звернення: 27.03.2023).

References

1. Horova, K.O., Horovy, D.A., Sviyazov, M.V., & Sheverdina, A.V. (2017). Vyznachennia perspektiv elektromobiliv na rynku Ukrainy [Determination of the prospects of electric cars on the market of Ukraine]. *Problemy i perspektivy rozvytku pidpriemnytstva – Problems and prospects of entrepreneurship development*, 2, 33-38 [in Ukrainian].
2. Horova, K.O., & Sheverdina, A.V. (2015) Aktualnist zastosuvannia elektromobiliv v Ukraini [The relevance of the use of electric vehicles in Ukraine]. *Problemy i perspektivy rozvytku pidpriemnytstva - Problems and prospects of entrepreneurship development*, 3(1), 105-107 [in Ukrainian].
3. Zubenko, D.Yu., Kovalenko, A.V., Petrenko, O.M., Shavkun, V.M., & Olehno, M.Yu. (2016). Rozrobka enerhomekhanichnoi ustanovky dlia tiahы elektromobilia [Development of an electromechanical installation for traction of an electric vehicle]. *ScienceRise - ScienceRise*, 10(2), 6-15 [in Ukrainian].
4. Budko, V.I. (2016). Analiz dotsilnosti vprovadzhennia zariadnykh stantsii elektromobiliv na osnovi vidnovliuvanykh dzherel enerhii v Ukraini [Feasibility analysis of the implementation of electric vehicle charging stations based on renewable energy sources in Ukraine]. *Vidnovliuvana enerhetyka - Renewable energy*, 4(47), 32-41 [in Ukrainian].
5. Gurtovyi, M.Yu., & Popov, S.V. (2016). Modeliuvannia ta optymizatsiia parametriv elektromobiliv z kombinovanymy rezhymamy enerhozhyvlennia [Modeling and optimization of parameters of electric vehicles with combined power supply modes]. *Molodyi vchenyi - A young scientist*, 5, 223-228 [in Ukrainian].
6. Sapozhnyk, D.I. (2022). Problemy ta perspektivy rozvytku rynku elektromobiliv v Ukraini [Problems and prospects for the development of the electric car market in Ukraine]. *Editorial board – Editorial board*, 553 [in Ukrainian].
7. Zapozhnyk, D.I. (2022). Ekspluatatsiini ta bezpekovi skladovi spozhyvnykh vlastyvostei elektromobiliv [Operational and safety components of consumer properties of electric cars]. *Editorial board – Editorial board*, 38 [in Ukrainian].
8. Leontovych, A. O., & Gaikova, T.V. (2022). Doslidzhennia roboty elektrovantazhivok na kontaktnykh liniakh pry konteinernykh perevezenniakh [Study of operation of electric trucks on contact lines during container transportation]. *Pidvyshchennia nadiinosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system - Increasing the reliability and efficiency of machines, processes and systems*, 43 [in Ukrainian].
9. Martins, H., Henriques, C.O., Figueira, J.R., Silva, C.S., & Costa, A.S. (2023). Assessing policy interventions to stimulate the transition of electric vehicle technology in the European Union. *Socio-Economic Planning Sciences*, 101505 [in English].

10. Wicki, M., Brückmann, G., Quoss, F., & Bernauer, T. (2023). What do we really know about the acceptance of battery electric vehicles?—Turns out, not much. *Transport Reviews*, 43(1), 62-87 [in English].
11. Athanasopoulou, L., Bikas, H., Papacharalampopoulos, A., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2023) An industry 4.0 approach to electric vehicles. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(2), 334-348 [in English].
12. Sait Rehionalnoho servisnoho tsentru HSTs MVS v Cherkaskii oblasti: website [Website of the Regional Service Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine in the Cherkassy region]. *chk.hsc.gov.ua*. Retrieved from <https://chk.hsc.gov.ua/2023/01/24/majbutnye-za-elektromobilyami-tse-ochevidno-i-neminuche/> [in Ukrainian].
13. Sait «Tyzhden» [Website "Week"]. *week.dp.gov.ua*. Retrieved from <http://week.dp.gov.ua/osvitnia-prohrama/pislya91/elektromobilii> [in Ukrainian].
14. Sait «Auto 24» [Website «Auto 24»]. *auto.24tv.ua*. Retrieved from https://auto.24tv.ua/skilky_naspravdi_mashyn_v_ukraini_bahato_chy_malo_n43694 [in Ukrainian].
15. Sait «NV Business» [Website «NV Business»]. *biz.nv.ua*. Retrieved from <https://biz.nv.ua/ukr/publications/elektromobilni-rik-chim-privabljujut-ukrajintsiv-mashini-na-elektrotjazi-1317134.html> [in Ukrainian].
16. ITC: Sait [Website «ITC»] Retrieved from <https://itc.ua/ua/novini/skilky-legkovyh-elektromobiliv-v-ukrayini-na-pochatok-2023-roku-takyh-avto-zareyestrovano-majzhe-47-tys/>
17. Sait «AutoGeek» [Website «AutoGeek»] Retrieved from <https://autogeek.com.ua/zarydni-stancii/> [in Ukrainian].

Tetiana Haikova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Murashko**, post-graduate
Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Promoting the Introduction of Electric Vehicles as a Scientific and Technical Innovation in the Field of Road Transport

The purpose of this study is to analyze the consequences of the implementation of the concept of market orientation on the Ukrainian market of passenger electric cars and to determine the impact of innovations on its development. It is also necessary to analyze the application of new constructive solutions in the field of road transport, which contribute to the wider introduction of electric vehicles.

As of January 1, 2023, the total number of passenger electric cars registered in Ukraine is 46,830 cars. Thus, the share of electric vehicles in the total mass of vehicles in our country is about 0.5%. The main driver of the increase in the number of electric cars was economy and a higher level of environmental safety compared to diesel and gasoline cars. Ukraine prioritizes the transition to electric road transport by January 1, 2030. In 2017, the Ministry of Infrastructure of Ukraine developed a 15-year strategy for the development of electric transport in Ukraine. According to the Ministry of Infrastructure of Ukraine, as of November 1, 2021, the Ukrainian charging network for electric vehicles included 3,244 stations with 7,661 terminals. Of them, high-speed (power over 22 kW) – 1,835 units, i.e. 24%. Other 5826 units. (76%) – ordinary terminals with a capacity of up to 22 kW. The main obstacles to the wider introduction of electric vehicles are their cost, underdeveloped recharging, service and repair infrastructure, as well as an insufficient number of maintenance and repair specialists. According to analytical data, the world electric car market is facing a serious transformation. Due to a number of factors such as a jump in electricity prices in Europe, the introduction of electric car taxation, the end of subsidies, problems with the development of global charging infrastructure, a sharp increase in the prices of raw materials, in particular, lithium and nickel. As a result, as noted, the rate of growth of sales of electric cars may slow down, and in some regions may even come to nothing.

Electric cars give owners the opportunity to completely abandon traditional types of fuel and save their own money, and the state to localize the sphere of regulation of the level of environmental and man-made safety in the locations of power plants.

road transport, innovations, electric cars, technologies of the future, ecological safety

Одержано (Received) 25.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 10.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

А.В. Йовченко, доц., канд. техн. наук, **І.А. Шльончак**, доц., канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна
e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua; Igor_Shlionchak@ukr.net; 438knl@gmail.com146

Розробка алгоритма моніторингу стану водія за допомогою Android-застосунку з метою підвищення рівня активної безпеки

В статті виконано аналіз методів моніторингу небезпечного стану водія під час руху транспортного засобу. Наведено перелік програм, які використовуються при цьому. Для проведення досліджень було обрано мобільний додаток Drive Safely, в основу роботи якого покладено моніторинг стану очей та роту водія. Згідно проведених досліджень PERCLOS очей не повинен перевищувати 28 %, а PERCLOS роту не повинен перевищувати 30 %. Розроблено алгоритм розпізнавання аварійних ситуацій у кабіні транспортного засобу на основі зображення очей та роту водія із фронтальної камери смартфона. **моніторинг, небезпечний стан, водій, активна безпека, аварійні ситуації, смартфон, транспортний засіб**

Постановка проблеми. Безпека дорожнього руху - це одне з найважливіших завдань суспільства, а дорожньо-транспортні пригоди (ДТП) є однією з найсерйозніших загроз для здоров'я та життя людей у всьому світі. Кількість ДТП, викликані станом втоми або ослаблення уваги водія за кермом транспортного засобу (ТЗ), з кожним роком зростає та призводить до травматизму серед населення у всьому світі. Симптомами сонливості водія є: повіки моргають частіше, стають важчими; зі складністю фокусується зір; часте позіхання; важко тримати голову прямо; водій не звертає уваги на дорожні знаки, з'їжджає зі смуги руху, виїжджаючи на узбіччя, та не витримує належної дистанції руху [1-3].

Слід зазначити, що для підвищення рівня активної безпеки, потрібно звернути ретельну увагу на роботу системи «водій-автомобіль-дорога». Наприклад, відомо, що під час руху водії повинні враховувати небезпеку, наслідки втоми та підвищеного рівня сонливості завжди. Однак, перед тим, як почати рух, необхідно створити умови з правильним режимом праці та відпочинку. Стосовно доріг, їх потрібно обладнати віброшумовими бордюрами на узбіччі або розділовій смузі. Саме такі конструктивні елементи доріг будуть знижувати кількість ДТП за рахунок активації водія, що перебувають у сонному стані. А от щодо ТЗ, то автомобілі слід обладнати системами, здатними виявляти зміни фізіологічного рівня неспання та параметрів керування, характерних для стомленого водія [4]. Дослідженню саме цієї проблематики і присвячена дана робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки обладнати ТЗ сучасними системами активної безпеки досить витратно та доступно лише для автомобілів класу преміум, набуває поширення моніторинг стану водія за допомогою смартфона, який є в наявності практично в кожного.

В роботах [5-8] зазначається, що мобільні системи допомоги водієві здійснюють постійне спостереження за поведінкою водія в кабіні ТЗ та ситуацією навколо нього. При цьому відтворюється реальна картина дорожнього руху з метою підвищення рівня активної безпеки.

Наявність вбудованої в смартфон фронтальної камери дозволяє фіксувати зображення обличчя людини, передавати отриману інформацію алгоритмам комп'ютерного зору, не вимагаючи установки додаткового спеціалізованого апаратного устаткування. Як зазначається у роботі [9], смартфони з фронтальною камерою, акселерометром, GPS, магнітометром, гіроскопом тощо можуть застосовуватись в системах активної безпеки водія ТЗ при розробці програм моніторингу поведінки водія, розпізнаючи характеристики його обличчя, зокрема очей та роту, а також встановлюючи стан ослабленої уваги або втоми під час руху. Одними із популярних мобільних Android-застосунків, які виконують вище зазначені завдання, є: iOnRoad, Augmented Driving, NightDrive, Driver Guard, Nexar – AI Dashcam, Drive Safely [10-14].

Автори робіт [11-12] зазначають, що з використанням, наприклад, додатку iOnRoad об'єкти попереду водія реєструються в реальному часі, визначаючи швидкість за допомогою сенсорів. Augmented Driving надає водієві інформацію щодо недотримання дистанції з ТЗ, що рухається попереду, про перевищення швидкості ТЗ та перетинання дорожньої розмітки. Застосунок NightDrive слідкує за очима та попереджає про стан ослабленої уваги водія. Driver Guard попереджує про фронтальне зіткнення. Nexar AI Dashcam – записує відеопоток, зберігає номерні знаки ТЗ, що порушують правила дорожнього руху. Drive Safely моніторить стан очей, нахил голови та одночасно є навігатором. Однак, дані програми працюють окремо одна від одної, тобто між ними немає функціонального зв'язку. Ось чому постає потреба в розробці застосунка, у якого буде функціональний зв'язок між різними параметрами втоми водія з метою підвищення рівня активної безпеки [13-14].

Оскільки найбільша кількість ДТП трапляється через втому та ослаблену увагу водія із переліку наданих програмних Android-застосунків для проведення досліджень було обрано мобільний додаток Drive Safely. В основу роботи даного застосунка покладено моніторинг стану очей та роту.

Моніторинг стану рівня втоми водія за кермом відбувається з використанням індикатора сонливості PERCLOS (PERcentage of eye CLOSure – час, протягом якого очі водія закриті деякий час). Робочим параметром даного застосунка є тривалість закриття повік, яка не повинна перевищувати 3 секунди [15]. При сонливості швидкість реакції та координація рухів водія уповільнюється, знижується увага та пам'ять. А від так водії можуть не усвідомлювати, що вони знаходяться в стані сонливості.

Одночасне використання комплексу характеристик обличчя водія підвищує точність та достовірність отриманих результатів розпізнавання. Такі функціональні параметри PERCLOS, як: відкритість та закритість очей; напрям погляду; тривалість та частота моргання повік; кут нахилу та повороту голови; ступінь відкритості роту людини тощо, здійснюється за допомогою програмних бібліотек OpenCV та Dlib. Останні використовують 68 характерних точок людини, в тому числі положення та розміри очей, роту і носу. Система PERCLOS характеризує також і час, протягом якого повіки водія закриті більш ніж на 80 %. Якщо показник PERCLOS спостерігається понад 28 % часу протягом однієї хвилини, то вважається, що людина перебуває у стані сонливості. Додатковим критерієм визначення сонливості є частота моргання очей. Тривалість моргання повік визначається як час, витрачений на змикання верхньої та нижньої повік. Позіхання також є важливим параметром і часто використовується індикатором при моніторингу стану сонливості водія. Як результат, швидкість реакції водія уповільнюється, ускладнюється прийняття рішень, а також знижується увага, пам'ять, страждає координація рухів [16].

Також потрібно врахувати, що при керуванні ТЗ більше чотирьох годин знижується швидкість реагування водія вдвічі, протягом 8 годин в 5-7 разів. Водій стає

неуважним: голова може бути повернута або не спрямована в напрямку руху ТЗ більш, ніж на 2 секунди. При проходженні водієм поворотів ліворуч чи праворуч кут повороту голови водія фіксується в межах 15° чи взагалі відсутній в напрямку руху ТЗ. При цьому водій перебуває в стані невпевненості безпеки маневру [17-18].

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз існуючих систем моніторингу стану водія з використанням мобільного Android-застосунку, для підвищення рівня активної безпеки, з розробкою алгоритму моніторингу стану водія. При цьому враховуються такі параметри, як поворот та нахил голови, тривалість моргання повіками, позіхання. Як результат аналізується стан сонливості, ослабленої уваги та сп'яніння водія.

Виклад основного матеріалу. Для визначення моргання очей використовується коефіцієнт співвідношення висоти та ширини ока *Ear* – показник PERCLOS (рис. 1).



Рисунок 1 – Схематичне позначення коефіцієнта співвідношення висоти та ширини ока EAR

Джерело: розроблено авторами

Коефіцієнт співвідношення висоти та ширини ока можна розрахувати за наступною формулою:

$$ear = \frac{|p_2 - p_6| + |p_3 - p_5|}{2|p_1 - p_4|} \quad (1)$$

Коефіцієнт співвідношення висоти та ширини ока *ear* має менші значення коли очі відкриті, та більші – коли закриті. Наприклад, при значенні 0,23 очі слід вважати закритими.

Критерієм дрімоти є стан, коли очі закриті більше ніж на 80 % протягом однієї хвилини. У водіїв, що знаходяться в стані дрімоти, уповільнені рухи очей, зменшений тонус м'язів обличчя і збільшений час закритих очей.

Позіхання менш небезпечніше для водіїв у порівнянні із закритістю очей. Для моніторингу позіхання використовується співвідношення сторін роту, тривалість позіхання та їх періодичність. Потрібно враховувати, що позіхання може відбутися і в нормальному стані людини. Згідно [19] очі та рот можуть бути в одному з трьох станів: закриті, напіввідкриті чи повністю відкриті. Це відповідає низькочастотному, проміжному та високочастотному станам. Стан втоми можна поділити на три рівні: нормальна, легка та сильна втома. Шляхом тестування частоти моргання та позіхання необхідно проаналізувати різні стани втоми: від легкої до важкої. В роботі [20-21] PERCLOS очей при проміжному стані не повинен перевищувати 21 %. Однак, згідно проведених нами досліджень та при аналізі літературних даних цей параметр не повинен перевищувати 28 %. Три параметри PERCLOS очей (P) та PERCLOS роту (K) наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – PERCLOS очей та роту

Стан	Низькочастотний	Проміжний	Високочастотний
Рот	$K < 20\%$	$20\% < K < 30\%$	$K > 30\%$
Очі	$P < 13\%$	$13\% < P < 28\%$	$P > 28\%$

Джерело: розроблено на підставі [20-21]

Розпізнавання стану сонливості та ослабленої уваги було проведено з використанням смартфона Samsung Galaxy A8 та програмного забезпечення Drive Safely. На основі проведених досліджень зовнішніх ознак втомлюваності, при різних параметрах PERCLOS очей та роту, можна визначити 9 різних станів водія (табл. 2).

Таблиця 2 – Таблиця зовнішніх ознак втомлюваності

Ситуація	Рот	Очі	Результат
1	Низькочастотний	Низькочастотний	Бадьорість
2	Низькочастотний	Проміжний	Незначна втома
3	Низькочастотний	Високочастотний	Сильна втома
4	Проміжний	Низькочастотний	Бадьорість
5	Проміжний	Проміжний	Сильна втома
6	Проміжний	Високочастотний	Сильна втома
7	Високочастотний	Низькочастотний	Незначна втома
8	Високочастотний	Проміжний	Сильна втома
9	Високочастотний	Високочастотний	Сильна втома

Джерело: розроблено авторами

Було оцінено точність розпізнавання небезпечного стану водія залежно від рівня освітлення в кабіні ТЗ (рис. 2).

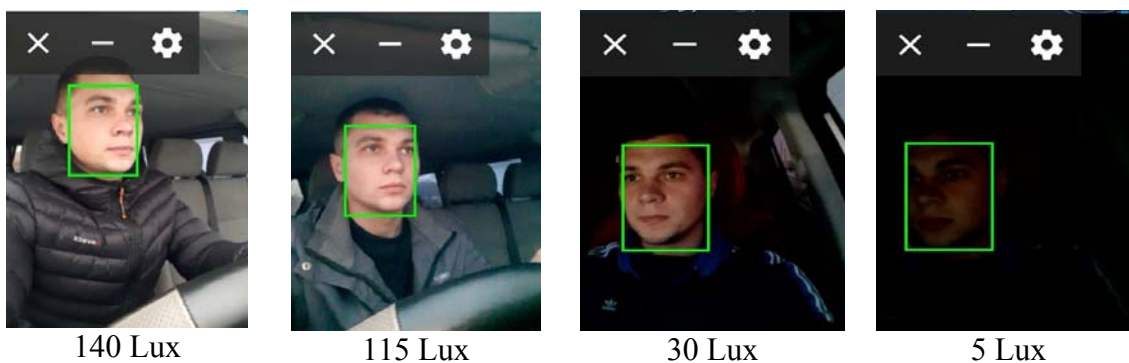


Рисунок 2 – Реєстрація стану водія з використанням програмного Android-застосунка Drive Safely в залежності від рівня освітленості

Джерело: розроблено авторами

Смартфон було встановлено таким чином, щоб камера мала можливість повністю знімати положення голови та характеристики обличчя. При цьому забезпечувалося відсутність зайвих предметів в кадрі.

На основі проведених досліджень, точність розпізнавання стану водія при використанні програмного забезпечення Drive Safely становила 80 % при мінімальному рівні освітленості 30 Lux (рис. 3).

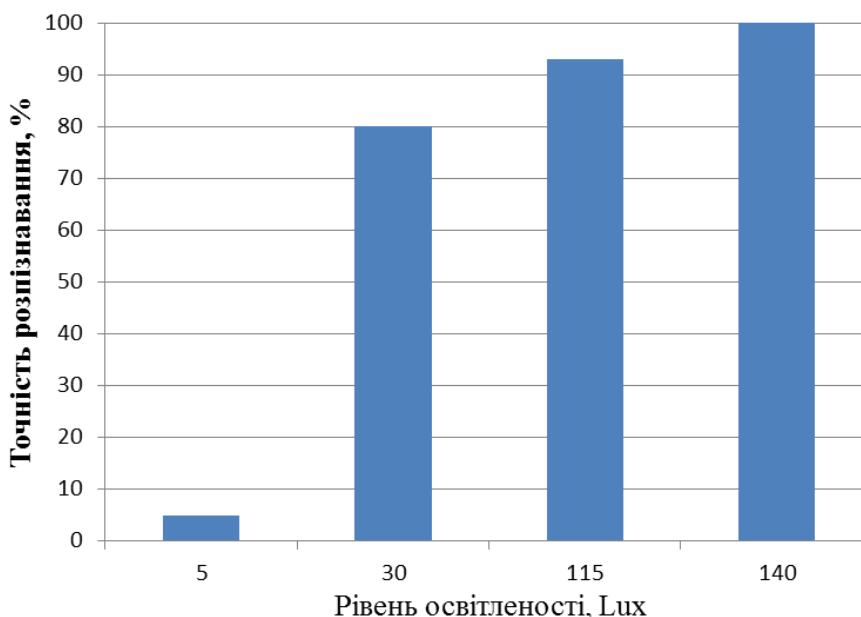


Рисунок 3 – Залежність точності розпізнавання характеристик обличчя від рівня освітленості в кабіні ТЗ

Джерело: розроблено авторами

Під час руху ТЗ, якщо водій знаходиться в небезпечному стані, час до зіткнення становить 2-3 секунд. Традиційно це залежить від реальних умов руху ТЗ та часу реакції водія, яка зазвичай сягає від 0,5 до 1,5 секунд. У свою чергу час реакції водія характеризує момент виявлення небезпечного стану до початку прийняття водієм відповідних рішень.

В результаті проведеного аналізу існуючих Android-застосунків розроблено алгоритм розпізнавання аварійних ситуацій у кабіні ТЗ. Алгоритм було отримано на основі зображення фронтальної камери смартфону (рис. 4).

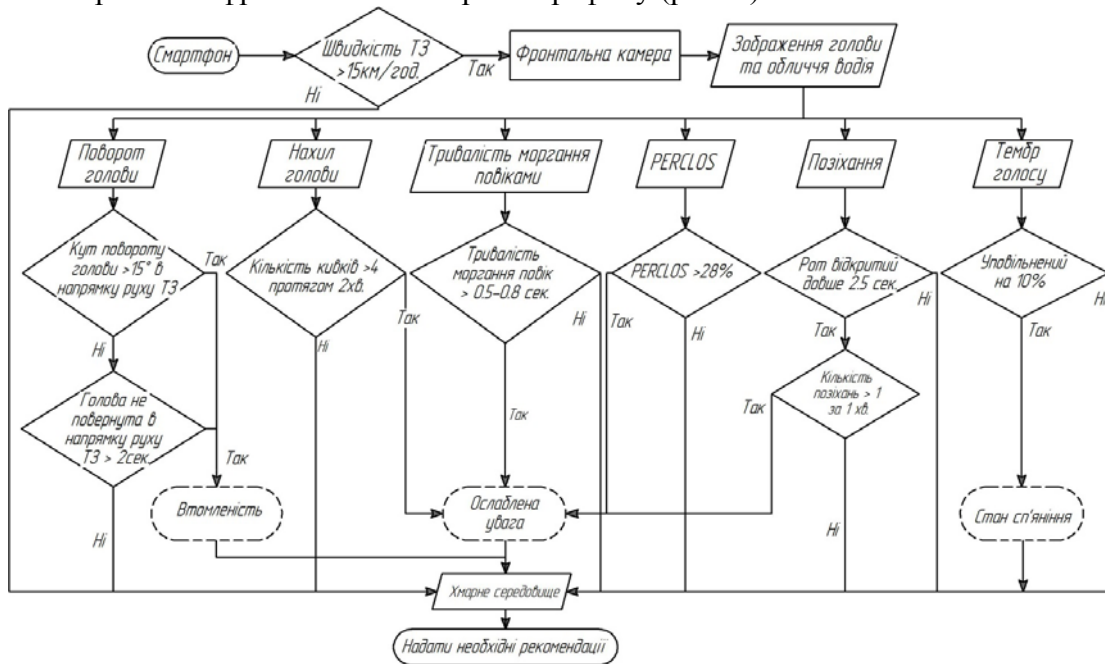


Рисунок 4 – Алгоритм розпізнавання аварійних ситуацій у кабіні ТЗ на основі зображення фронтальної камери смартфону

Джерело: розроблено авторами

В даному алгоритмі враховано всі можливі небезпечні стани водія, що перебуває за кермом ТЗ. Для кращого функціонування такого алгоритму необхідно, щоб він був з'єднаний з хмарним середовищем для самовдосконалення за рахунок взаємодії з іншими учасниками дорожнього руху.

Камера смартфона отримує відповідний масив вхідних параметрів. Далі виконується конвертування отриманих даних та обробка параметрів водія. При цьому звертається обов'язкова увага на інші функціонали смартфона, а саме: показники акселерометру, магнітометру, гіроскопу, GPS, мікрофону. Всі ці параметри допомагають більш адекватно охарактеризувати поточний стан водія, виявити небезпечну його поведінку та надати необхідні рекомендації. Для ефективної роботи смартфон збирає таку інформацію про водія, як: поворот та нахил голови, тривалість моргання повіками, показники PERCLOS, позіхання, а також тембр голосу.

Висновки. В результаті проведених досліджень було здійснено аналіз існуючих систем моніторингу стану водія з використанням мобільного Android-застосунку Drive Safely. При цьому враховувались наступні параметри: поворот і нахил голови, моргання та позіхання, стан сонливості, ослабленої уваги чи сп'яніння. Ці параметри можна розглядати окремо, поєднувати та, як наслідок, визначати стан людини.

В результаті проведеного аналізу існуючих Android-застосунків розроблено алгоритм розпізнавання аварійних ситуацій у кабіні ТЗ. Алгоритм було отримано на основі зображення фронтальної камери смартфона. Використання в програмі даного алгоритму та під'єднання його результатів до хмарного середовища дозволить йому самовдосконалюватись та підвищить ефективність функціонування, підвищуючи таким чином рівень активної безпеки.

Список літератури

1. Driver fatigue and road accidents. The Royal Society for the Prevention of Accidents, 2011. 4 p.
2. Akerstedt T., Gillberg M. Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Int. Journal Neurosci.* 2014. Vol. 52. p. 29-37
3. Driver Identification Using Driving Behavior Signals / T. Wakita et al. *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2005. 396-401p.
4. Гюлев, Н. У., Доля В. К., Доля О. В. Экспериментальное определение транспортного утомления пассажиров при поездке на работу. Київ: УкрНИИТИ 18.06.90 г., № 1136.Укр90
5. Jiadi Yu, Yingying Chen, Xiangyu Xu. Sensing Vehicle Conditions for Detecting Driving Behaviors, 2018. 81 p.
6. Distracted Driving: Traffic Safety Facts Research Note. Report No. DOT HS 812 517, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration. April, 2018. 6 p.
7. Global status report on road safety 2022. Geneva: World Health Organization; 2022. URL: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/277370/WHO-NMH-NVI-18.20-eng.pdf>.
8. Fatigue and crash risk URL: https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/fatigue/fatigue_and_road_crashes/fatigue_and_crash_risk_en.
9. W. Sakpere, M. Adeyeye-Oshin, N. Mlitwa. A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal.* №29. 2017. 145-197p.
10. iOnRoad. URL: <http://www.ionroad.com> (дата звернення: 17.03.2023).
11. Augmented Driving. URL: <http://www.imaginize.com/> (дата звернення: 20.03.2023)
12. Driver Guard, URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.badrit.cv.vehicledetect> (дата звернення: 20.03.2023).
13. Nexar – AI Dashcam. URL: <https://www.getnexar.com/> (дата звернення: 20.03.2023)
14. NightDrive. URL: <https://itunes.apple.com/us/app/nightdrive/id902703316?mt=8> (дата звернення: 20.03.2023).
15. Dinges, D. PERCLOS: A Valid Psychophysiology Measure of Alertness as Assessed by Psychomotor Vigilance, Technical Report Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 2018
16. Viola P., Jones M. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features Mitsubishi Electr. Res. Labs. Cambridge, MA, USA, 2014.
17. Open CV library, URL: <https://opencv.org/> (дата звернення 20.03.2023).

18. Метод Виолы-Джонса как основа для распознавания лиц, URL: <https://habrahabr.ru/post/133826/>.
19. Soukupova T, Cech J. Real-Time Eye Blink Detection using Facial Landmarks, Center for Machine Perception, Department of Cybernetics Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague, 2016.
20. Towards Data Science, 2016. URL: <https://towardsdatascience.com/> (дата звернення 20.03.2023).
21. Eriksson, M. Eye-tracking for detection of driver fatigue. Papanikolopoulos, Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017. 314-319p.

References

1. Driver fatigue and road accidents (2011). The Royal Society for the Prevention of Accidents [in English].
2. Akerstedt, T. (2014). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *Int. J. Neurosci. Vol. 52.* 29-37 [in English].
3. Driver Identification Using Driving Behavior Signals (2015). *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems.* 396-401 [in English].
4. Gjulev, N.U., Dolja V.K., & Dolja, O.V. Jeksperimental'noe opredelenie transportnogo utomlenija passazhirovo pri poezdke na rabotu. Kiiiv: UkrNIINTI 18.06.90 g., № 1136.Uk90 [in Russian].
5. Jiadi, Yu, Yingying, Chen & Xiangyu, Xu (2018). Sensing Vehicle Conditions for Detecting Driving Behaviors [in English].
6. Distracted Driving: Traffic Safety Facts Research Note (2018). *Report No. DOT HS 812 517, Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration. April, 6* [in English].
7. Global status report on road safety (2023). Geneva: World Health Organization. *apps.who.int*. Retrieved from <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/277370/WHO-NMH-NVI-18.20-eng.pdf>. [in English].
8. Fatigue and crash risk (2015). *ec.europa.eu*, Retrieved from https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/knowledge/fatigue/fatigue_and_road_crashes/fatigue_and_crash_risk_en [in English].
9. W. Sakpere, M. Adeyeye-Oshin & N. Mlitwa (2017). A state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal. №29.* 145-197 [in English].
10. iOnRoad (2023). *ionroad.com*. Retrieved from <http://www.ionroad.com> [in English].
11. Augmented Driving (2023). Retrieved from <http://www.imaginyze.com/> [in English].
12. Driver Guard (2023). *play.google.com*. Retrieved from <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.badrit.cv.vehicledetect> [in English].
13. Nexar – AI Dashcam. (2023). *getnexar.com*. Retrieved from <https://www.getnexar.com/> [in English].
14. NightDrive (2023). *itunes.apple.com*. Retrieved from <https://itunes.apple.com/us/app/nightdrive/id902703316?mt=8> [in English].
15. Dinges, D. (2018). PERCLOS: A Valid Psychophysiology Measure of Alertness as Assessed by Psychomotor Vigilance. *Technical Report Federal Highway Administration: Washington, DC, USA* [in English].
16. Viola, P. & Jones, M. (2014). Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features, *Mitsubishi Electr. Res. Labs. Cambridge, MA, USA* [in English].
17. Open CV library (2023). *opencv.org*. Retrieved from <https://opencv.org/> [in English].
18. Метод Виолы-Джонса как основа для распознавания лиц [Viola-Jones method as a basis for face recognition]. (2023). *habrahabr.ru*. Retrieved from <https://habrahabr.ru/post/133826/> [in Russian].
19. Soukupova, T. & Cech, J. (2016). Real-Time Eye Blink Detection using Facial Landmarks. Center for Machine Perception, *Department of Cybernetics Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague* [in English].
20. Towards Data Science. (2016). *towardsdatascience.com*. Retrieved from URL: <https://towardsdatascience.com/> [in English].
21. Eriksson, M. (2017). Eye-tracking for detection of driver fatigue. Papanikolopoulos, *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 314-319 [in English].

Alla Yovchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Shlionchak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Development of an Algorithm for Monitoring the Driver's Condition Using an Android Application in Order to Increase the Level of Active Safety

The purpose of the research is the analysis of existing systems for monitoring the driver's condition using an Android mobile application to increase the level of active safety with the development of an algorithm for monitoring the driver's condition. At the same time, such parameters as turns and tilts of the head, duration of eyelid blinking, yawning are taken into account. As a result, the state of drowsiness, impaired attention, and drunkenness of the driver is analyzed.

The article analyzes the methods of monitoring the dangerous condition of the driver during the movement of the vehicle. The list of programs used in this case is given. The Drive Safely mobile application was chosen for the research, which is based on monitoring the condition of the driver's eyes and mouth. Based on research, eye PERCLOS should not exceed 28% and mouth PERCLOS should not exceed 30%. An algorithm for recognizing emergency situations in the vehicle cabin based on the image of the driver's eyes and mouth from the front camera of a smartphone has been developed. As a result of the analysis of existing Android applications, an algorithm for recognizing emergency situations in the cabin of the vehicle was developed. The algorithm was obtained based on the image of the smartphone's front camera. This algorithm takes into account all possible dangerous conditions of the driver behind the wheel of the vehicle.

As a result of the conducted research, an analysis of the existing systems for monitoring the driver's condition using the Drive Safely mobile Android application was carried out. As a result of the analysis of existing Android applications, an algorithm for recognizing emergency situations in the cabin of the vehicle was developed. The use of this algorithm in the program and the connection of its results to the cloud environment will allow it to self-improve and increase the efficiency of its operation, thus increasing the level of active security.

monitoring, dangerous condition, driver, active safety, emergency situations, smartphone, vehicle

Одержано (Received) 23.03.2023

Прорецензовано (Reviewed) 04.04.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 629.114.45

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.146-153](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.146-153)

І.О. Хітров, доц., канд. техн. наук

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
Україна*

e-mail: i.o.khitrov@nuwm.edu.ua

Аналіз конструкції кузова вантажного транспортного засобу

Конструктивні параметри сучасних кузовів вантажних транспортних засобів повинні враховувати визначальні властивості перевезеного вантаж, умови експлуатації та спеціальні вимоги їх перевезень. У статті наведено аналіз типів кузовів транспортних засобів для вантажних перевезень. Розкрито їх призначення, конструктивні особливості і способи виготовлення. Описано вибір типу кузова для визначеного виду вантажу.

вантажний транспортний засіб, кузов, конструкція, спосіб виконання

Постановка проблеми. Транспорт є важливою складовою частиною єдиної транспортної системи нашої країни, за допомогою якого забезпечується задоволення

потреб населення та суспільного виробництва у перевезеннях пасажирів та доставки вантажів. Особлива увага приділяється спеціалізованому рухомому складу автомобільного транспорту (самоскиди, цистерни, фургони та ін.), які у свою чергу потребують спеціально підібраних типів кузовів для забезпечення цілісності вантажів з врахуванням його виду, величини партії та умов перевезень, можливості механізації вантажно-розвантажувальних робіт тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У науково-технічних джерелах в достатній мірі висвітлено результати досліджень конструктивних особливостей транспортних засобів та їх експлуатаційних властивостей, яка базується на відповідності науково-практичному взаємозв'язку між його конструкцією та ефективністю використання.

© І.О. Хітров, 2023

Досить поширеним є дослідження впливу конструктивних і експлуатаційних факторів, які проявляються під час руху транспортного засобу [1]. Відомим є напрацювання щодо дослідження впливу геометричних параметрів елементів дна кузова вантажного автомобіля на його напружено-деформований стан [2]. В роботі [3] одним із способів збільшення вантажопідйомності кузова вантажного транспортного засобу досягнуто шляхом заміни традиційних прямокутних коробчастих профілів на балки С-подібного перерізу.

Однак, такий взаємозв'язок потребує усесторонньої оцінки пристосованості всіх елементів конструкції не тільки для руху транспортного засобу, але і до фактичної області застосування, яка безпосередньо характеризується типом його кузова.

Постановка завдання. Конструктивне виконання та ефективність транспортного засобу характеризується визначеними технічними параметрами і направлені на досягнення максимального результату транспортного процесу перевезень [4]. Для оцінки і вибору транспортного засобу необхідно обов'язково врахувати і особливості конкретного вантажу та умов його перевезення.

Метою даної роботи є аналіз кузовів транспортних засобів за їх призначенням, конструкцією, компонуванням, які широко застосовуються у всіх галузях народного господарства і мають відповідати заявленим вимогам.

Виклад основного матеріалу. В статті 1 Закону України «Про автомобільний транспорт» дано визначення, що автомобіль вантажний – це автомобіль, який за своєю конструкцією та обладнанням призначений для перевезення вантажів [5]. Він поділяється на загального призначення, спеціалізованого та спеціального. Основою для побудови сімейства вантажних транспортних засобів служить базове шасі (рис. 1).

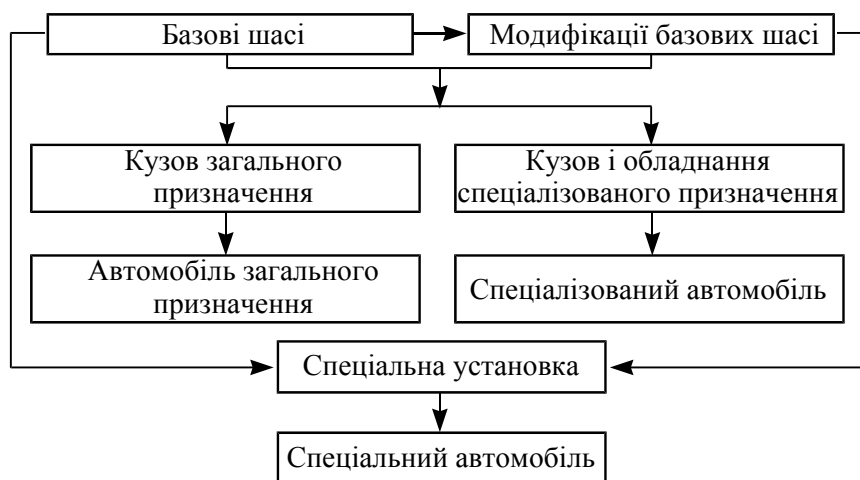


Рисунок 1 – Схема побудови сімейства вантажних транспортних засобів

Джерело: [6, с. 10]

На транспортних засобах застосовують різні типи кузовів, які відрізняються призначенням, конструктивним виконанням і компонуванням.

Призначення кузова фактично визначає область застосування транспортного засобу (або навпаки). На вантажному транспортному засобі встановлюється кузов для перевезення вантажів, і додатково до нього – кабіна (для розміщення водія та експедитора).

До спеціалізованого рухомого складу належать транспортні засоби, які призначені для перевезення однорідних вантажів і обладнані різними пристроями, які

забезпечують їх цілісність, механізацію вантажно-розвантажувальних робіт та ефективне використання в різних дорожніх та кліматичних умовах [4].

Спеціальні кузова, наприклад: сміттєвози, пожежні автомобілі, автокрани і т.д., як правило, встановлюються на рамі (шасі) вантажних транспортних засобах, щоб вони могли виконувати поставлені завдання.

Оскільки вантаж (продукція) відрізняються за своїми властивостями, тому для його перевезень ставляться певні вимоги до кузова транспортного засобу, зокрема:

- для піску, гравію – потрібний відкритий кузов;
- для цементу, кормів для тварин – закритий кузов з можливістю постійного перемішування;
- для рідини (харчової і хімічної продукції) – герметичні резервуари, у яких рідина не повинна реагувати з матеріалом резервуара;
- для швидкопсувної продукції – ізотермічні рефрижератори, які здатні працювати на охолодження або підігрівання;
- для будівельних матеріалів, довгомірних матеріалів, панелей покриття необхідна спеціальна рамна конструкція (платформа, ферма, коніки).

Залежно від конструкції кузова можливе виконання каркасними, напівкаркасними або безкаркасним способом.

Каркасний кузов має жорсткий просторовий каркас, до якого кріпиться зовнішнє і внутрішнє його облицювання.

Напівкаркасний кузов має тільки деякі частини каркасу, з'єднані між собою зовнішнім і внутрішнім облицюванням.

Для надання безкаркасному кузову необхідної жорсткості окремим його елементам надають спеціальної форми і перерізу.

Кузова універсальних автомобілів-самоскидів мають, як правило, прямокутний, коритоподібний і напівеліптичний поперечний переріз, а поздовжній переріз – тільки прямокутний (рис. 2).

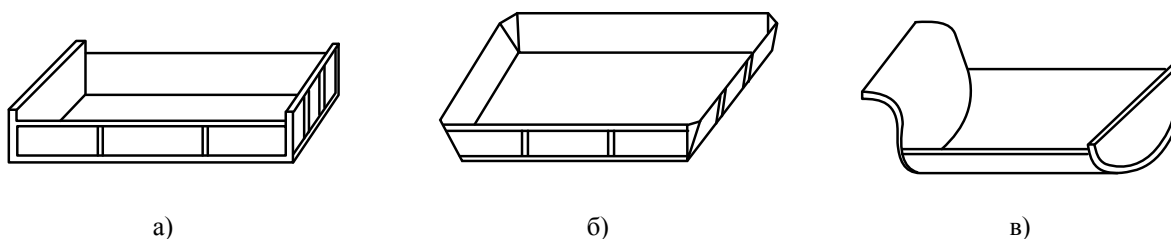


Рисунок 2 – Прямокутна (а), коритоподібна (б) та напівеліптична (в) форма кузова автомобіля-самоскида

Джерело: розроблено автором

Поперечний переріз кузова вибирається для різних вантажів, виходячи з необхідності забезпечити зниження центру ваги вантажу, повноту вивантаження вантажу, необхідної жорсткості.

При прямокутному перерізі кузова знижується центр ваги і підвищується жорсткість, а його місткість при однакових габаритних розмірах більша, ніж у кузовів з коритоподібним і напівеліптичним перерізом. Більш повне розвантаження забезпечується при коритоподібному і напівеліптичному перерізі кузова. Кузова коритоподібного перерізу застосовуються не тільки при задньому вивантаженні, але і при бічному (в цьому випадку коритоподібним є не поперечний, а поздовжній переріз). Напівеліптичний переріз має більшу жорсткість, проте для такого перерізу підвищується центр ваги і, відповідно, знижується його стійкість.

Самоскиди для перевезення сипких вантажів, які мають великий кут природного скосу (вологий ґрунт, глина, руда, шлак) і працюють за межами міста або шосейних доріг (кар'єри) обладнуються кузовами без заднього борту. При цьому задня частина підлоги кузова при піднята з метою запобігання падіння вантажу на задні колеса. Такі кузова називають кузовами ковшового типу (рис. 3, а). Кузова кар'єрних самоскидів мають днища не тільки з при піднятою задньою частиною, але і похилою основною частиною вперед. Нахил днища вперед робиться з метою зниження центра ваги G автомобіля-самоскида і збільшення навантаження на передню вісь. Такі кузова називаються кузовами совкового або V-подібного типу (рис. 3, б).

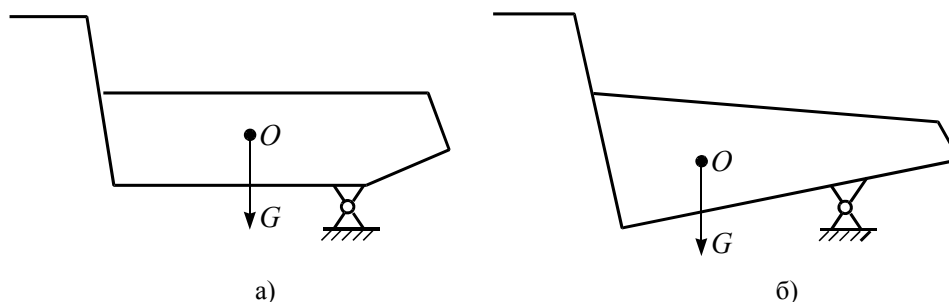


Рисунок 3 – Схеми кузова автомобіля-самоскида ковшового (а) та совкового (V-подібного) типу (б)

Джерело: розроблено автором.

Конструкція фургонів повинна бути максимально уніфікована. Різну вантажопідйомність фургонів бажано отримувати зміною розмірів фургона за його довжиною. Для фургонів великої вантажопідйомності зниження їх власної маси має особливе значення, тому вони мають несучу конструкцію, основні елементи яких виготовлюються з легких сплавів у поєднанні з пластмасами.

Особливості конструкції ізоtermічних фургонів, фургонів-рефрижераторів та опалювальних фургонів полягає в тому, що вони мають термоізоляцію. Додатковою вимогою до конструкції цих фургонів є високі теплотехнічні властивості при відносно малій власній масі, надійне ущільнення дверей і легкість очищення.

Термоізоляцію кузова здійснюють двома основними методами: напленням поліуретану або іншого ізоляційного матеріалу ззовні або всередині готового кузова і встановлення на основу шасі зарані виготовлених плит з ізоляційних матеріалів (цей метод забезпечує більш високу ефективність термоізоляції).

Процес виготовлення термоізоляційних плит досить простий. Гаряча маса пінистого полістиролу або поліуретанового пінопласту під невеликим тиском заливається в простір між металевими листами і затвердіває зі збільшенням об'єму, що призводить до ущільнення матеріалу термоізоляції на поверхнях, які дотикаються з металевими листами. До зовнішньої і внутрішньої сторони кожної плити приклеюються листи дюралюмінію. Наведемо загальну будову фургона-рефрижератора з використанням термоізоляційних плит (рис. 4).

Охолодження внутрішнього простору кузова фургона забезпечується механічними або хімічними способами. Механічні системи бувають двох типів: з автономною холодильною установкою, або з попередньо замороженими плитами з евтектичним розчином (зеротори). При хімічному способі охолодження рідкі або тверді тіла (сухий лід, зріджені гази) перетворюються в газ з поглинанням тепла з оточуючого середовища.

При конструюванні автомобільних цистерн враховують фізико-хімічні властивості перевезеного вантажу, умови експлуатації, спеціальні вимоги, що стосуються небезпечних рідких і порошкоподібних вантажів.

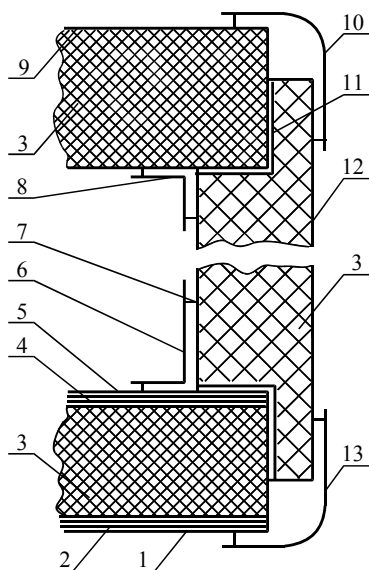


Рисунок 4 – Конструктивна схема фургону з термоізоляційних плит:

- 1 – зовнішнє облицювання підлоги; 2 – дерев'яна підкладка; 3 – термоізоляція; 4 – металева обшивка підлоги; 5 – внутрішнє пластикове облицювання; 6 – внутрішнє облицювання стін з алюмінію; 7 – ущільнення; 8 – алюмінієвий кутник; 9 – зовнішнє і внутрішнє облицювання стелі з алюмінію; 10, 13 – гнуті профілі з алюмінію; 11 – між ізоляційна прокладка; 12 – зовнішнє сталеве облицювання

Джерело: [6, с. 161].

При виборі перерізу резервуарів і їхнього розміщення виходять з необхідності забезпечити зниження центра ваги і підвищення жорсткості та більш повного використання маси вантажу при його вивантаженні. Необхідна товщина стінок резервуара визначається, як правило, величиною внутрішнього тиску. З точки зору жорсткості резервуара круглий переріз переважний еліптичного, а еліптичний забезпечує більшу жорсткість, ніж трапецієподібний. Для збільшення жорсткості верхню частину резервуара часто підсилюють, особливо місця, де розташовані люки.

Цистерни з пластмасовими резервуарами застосовуються для перевезення харчових продуктів (вода, молоко, вино і т.п.), добрив, нафтопродуктів, хімічних речовин (за винятком деяких, реагуючих із пластмасами), а також численних порошкоподібних речовин, за винятком тих, які мають підвищені абразивні властивості.

Для виготовлення резервуарів цистерн широко застосовуються кольорові метали і сплави (наприклад, на основі алюмінію) через меншу вагу матеріалу, більшу довговічність, високу корозійну стійкість.

Поряд із зазначеними способами виготовлення резервуарів цистерн із термореактивних пластмас з одинарними стінками знаходять застосування резервуари з подвійними стінками типу «сендвіч».

Резервуари автомобільних цистерн, крім горизонтального розташування, можуть розташовуватися похило або вертикально. Вертикальне і похиле розташування резервуарів застосовується під час перевезення сипких вантажів з метою прискорення процесу вивантаження матеріалів, що мають малу текучість, за рахунок використання їх власної маси. Вертикально розташовані резервуари мають форму циліндра або кулі (з нижньою частиною у вигляді усіченого конуса). Похилі і горизонтальні резервуари мають круглий і еліптичний переріз. Іноді такі резервуари мають переріз у вигляді прямокутника.

При похилому та особливо при вертикальному розташуванні резервуарів підвищується центр ваги цистерн і, відповідно, знижується їхня стійкість. Зниження центра ваги досягається застосуванням не одного, а декількох вертикальних резервуарів для перевезення однієї і тієї ж маси вантажу. Для збільшення місткості, зниження центра ваги і дотримання габаритних обмежень за висотою похилі резервуари виконуються у вигляді усіченого циліндра в передній (верхній) його частині.

Рідини, за виключенням зріджених газів, перевозяться під атмосферним тиском. Для того, щоб забезпечити можливість «дихати» внутрішньому просторі резервуара при зміні температури, а також при навантаженні і розвантаженні, резервуари обладнуються запобіжними клапанами з фільтрами.

Цистерни для перевезення зріджених газів складаються з зовнішнього 3 і внутрішнього 1 резервуарів, у який заливається зріджений газ (рис. 5). З метою обмеження випаровування рідкого газу простір між внутрішнім і зовнішнім резервуаром заповнюється термоізоляційним матеріалом 2.

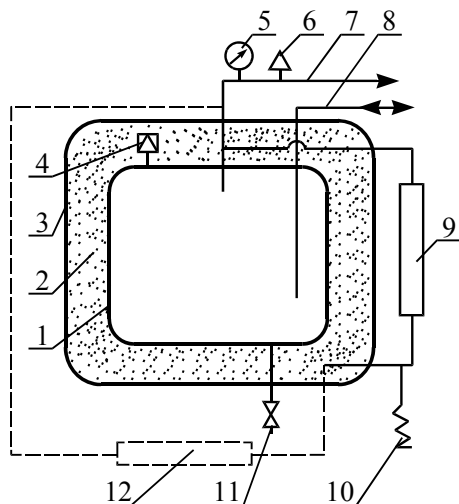


Рисунок 5 – Схема цистерни для перевезення зріджених газів:
 1 – внутрішній резервуар; 2 – термоізоляційний матеріал; 3 – зовнішній резервуар;
 4 – запобіжна мембрана; 5 – манометр;
 6 – запобіжний клапан;
 7 – труба для зменшення тиску; 8 – трубопровід для заправки зрідженого газу; 9 – вказівник рівня;
 10 – випарувач; 11 – патрубковий відбір проб; 12 – контроль вакууму в ізоляції
 Джерело: [7, с. 115].

Конструкції автомобілів-цистерн для перевезення сипких вантажів визначається властивостями цих вантажів, основними з яких є сипкість і схильність до ущільнення в процесі перевезення. Резервуари цистерн для перевезення підрозділяють на наступні дві групи: цистерни, які мають форму тіл обертання або близьких видів (циліндр, сфера, усічений конус), і цистерни, які мають форму паралелепіпеда або прямокутника в перерізі. Резервуари першої групи розміщують: вертикально (сферичний і напівсферичний в перерізі з усіченим конусом), горизонтально вздовж поздовжньої осі рухомого складу (циліндричні з розвантажувальними конусами в нижній частині) і похило до поздовжньої осі рухомого складу (циліндри з розвантажувальною камерою в задній частині). Резервуари прямокутного поперечного перерізу застосовуються переважно для перевезення відносно легких вантажів: зерна, муки, комбікормів, цукрового піску. Перевагами резервуарів прямокутного перерізу у порівнянні з резервуарами тіл обертання є більш повне використання габаритних розмірів і відносно низьке розміщення центру ваги.

Висновки:

1. Різноманітність вантажів, необхідність механізації робіт завантаження і розвантаження, дотримання умов перевезення визначають вимоги до конструкції кузова транспортного засобу.

2. Поперечний переріз кузова вибирається для різних вантажів, виходячи з необхідності забезпечити зниження центра ваги транспортного засобу, повноту вивантаження вантажу і необхідної жорсткості кузова.

3. Правильний підбір типу кузова характеризуватиме високий технічний рівень транспортного засобу за його компоновально-геометричними параметрами.

4. На основі отриманих даних аналізу конструктивного виконання кузова з врахуванням вимог до перевезеного вантажу та умов експлуатації можна розробити базові критерії з підвищення якості перевезень і вибору рухомого складу, як для кожного окремо взятого вантажу, перевезень в цілому, а також галузевого призначення.

Список літератури

1. Сахно В. П., Шарай С. М., Мурований І. С., Онищук В. П., Човча І. В. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху автопоїзда з причепом категорії О1. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. № 5(36), ч.1. С. 244-255. URL : [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.244-255](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.244-255)
2. Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Левкович М. Г., Вовк Ю. Я., Сташків М. Я., Капський Д. В. Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричепа вантажного автомобіля. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2021. №1 (24). С. 93-103.
3. K Vamshi Krishna, K Yugandhar Reddy, K Venugopal, K Ravi. Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 263, Issue 6. Pp. 1-17.
4. Хітров І. О., Кристопчук М. Є., Никончук В. М. Експлуатаційні властивості транспортних засобів. Рівне : НУВГП, 2022. 176 с. URL : https://ep3.nuwm.edu.ua/24432/1/EVTZ_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_zah.pdf (дата звернення: 28.04.2023).
5. Закон України «Про автомобільний транспорт». Київ : В-во Паливода. 2022. 96 с.
6. Кашканов А. А., Ребедайло В. М. Спеціалізований рухомий склад автомобільного транспорту: конструкція. Вінниця : ВДТУ, 2002. 164 с.
7. Дзюра В. О., Цьонь О. П., Вовк Ю. Я. Спеціалізований рухомий склад. Тернопіль: ТНТУ, 2016. 140 с.

References

1. Sakhno, V., Sharay, S., Murovany, I., Onyshchuk, V. & Chovcha, I. (2022). Vplyv konstruktyvnykh i ekspluatatsijnykh faktoriv na stijkist' rukhu avtopoizda z prychemom katehorii O1. [Influence of Constructive and Operational Factors on Stability of Movement of a Road Train with the Trailer of the O1 Category]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 5(36), Part I*. 244-255. Retrieved from : [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.244-255](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.244-255) [in Ukrainian].
2. Lyashuk, O., Hevko, I., Levkovych, M., Vovk, Y., Stashkiv, M. & Kapsky, D. (2021). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu dna kuzova napivprycheпа vantazhnoho avtomobilia [Investigation of the stress-strain state of a truck semi-trailer body bottom]. *Naukovyj visnyk Khersons'koi derzhavnoi mors'koi akademii – Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy, (24)*, 93-103 [in Ukrainian].
3. K Vamshi Krishna, K Yugandhar Reddy, K Venugopal & K Ravi. (2017). Design and analysis of truck body for increasing the payload capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 263, Issue 6*, 1-17 [in English].
4. Khitrov, I., Krystopchuk, M. & Nykonchuk, V. (2022). Ekspluatatsijni vlastyvosti transportnykh zasobiv. [Operational properties of vehicles]. Rivne : NUVHP. Retrieved from https://ep3.nuwm.edu.ua/24432/1/EVTZ_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_zah.pdf [in Ukrainian].
5. Zakon Ukrainy «Pro avtomobil'nyj transport» [Law of Ukraine «On Motor Vehicle Transport»] . (2022). (n.d.). Kyiv: V-vo PalyvodaThe [in Ukrainian].
6. Kashkanov, A., Rebedaylo, V. (2002). *Spetsializovanyj rukhomyj sklad avtomobil'noho transportu: konstruktsiia* [Specialized rolling stock for road transportation: design]. Vinnytsia : VDTU [in Ukrainian].
7. Dzyura, V., Tson, A., & Vovk, Y. (2016). *Spetsializovanyj rukhomyj sklad* [Specialized rolling stock of vehicles]. Ternopil': TNTU [in Ukrainian].

Ihor Khitrov, Assoc. Prof. PhD tech. sci.

National University of Water and Environmental Engineering, Ukraine

Analysis of the Truck Body Structure

Transport is an important component of the unified transport system of our country, which helps to meet the needs of the population and social production in passenger transportation and cargo delivery. Special attention is paid to specialized rolling stock of road transport. The design parameters of modern truck bodies should take into account the defining properties of the transported cargo, operating conditions and special requirements for their transportation. The purpose of the body actually determines the scope of the vehicle (or vice versa).

The purpose of this paper is to analyze the bodies of vehicles in terms of their purpose, design, and layout, which are widely used in all sectors of the national economy and must meet the stated requirements.

A truck is a vehicle that is designed and equipped for the transportation of goods. It is divided into general purpose, specialized and special purpose. The basis for building a family of trucks is the basic chassis.

Since the cargo (products) differ in their properties, certain requirements are imposed on the vehicle body for its transportation, in particular

- for sand, gravel - an open body is required;
- for cement, animal feed - a closed body with the possibility of constant mixing;
- for liquids (food and chemical products) - sealed tanks, in which the liquid should not react with the tank material;

- for perishable products - isothermal refrigerators that can be used for cooling or heating;

- for building materials, long materials, floor panels, a special frame structure is required.

Depending on the body design, it is possible to produce a frame, semi-frame or frameless body.

The cross-section of the body is selected for different cargoes based on the need to ensure a lower center of gravity of the cargo, complete unloading of the cargo, and the required structural rigidity.

An additional requirement for the design of bodies is compliance with specified thermal properties, which are achieved through the use of insulating materials and a cooling system.

Based on the data obtained from the analysis of the body design, taking into account the requirements for the transported cargo and operating conditions, it is possible to develop basic criteria for improving the quality of transportation and selecting rolling stock, both for each individual cargo, transportation in general, and for industry purposes.

freight vehicle, body, construction, method of execution

Одержано (Received) 14.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.153-158](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.153-158)

Ю.В. Дзядикевич, проф., д-р техн. наук, **Ю.М. Петришин**, асп., **М.Р. Башуцький**, асп., **М.В. Буряк**, доц., канд. техн. наук

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

Дослідження захисту деталей автомобілів від високотемпературного окислення

Стаття присвячена проблемі дослідження перспективних напрямків дослідження захисту деталей машинних від високотемпературного окислення шляхом формування багатошарової композиції.

Провівши аналіз результатів проведених робіт, присвячених проблемі підвищення жаростійкості елементів конструкцій машин можна стверджувати, що перспективним захистом їх від високотемпературного окислення є багатошарова композиція. Вивчення процесу формування на деталях машин шлікерного композиційного покриття показало, що боридні фази стосовно металевої основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних, силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття, можна застосовувати для виготовлення деталей машин які підпадають під вплив високих температур.

процес борування, багатошарові композиції, високолегованої сталі, підвищення експлуатаційних властивостей деталей

Постановка проблеми. Перспективним напрямом захисту деталей машин від високотемпературного окислення є поєднання різних методів нанесення покриття. Розробляючи високотемпературне захисне покриття, багато дослідників вважають, що такий захисний шар повинен виконувати цілий комплекс різних функцій. На наш погляд, такий підхід є помилковим, оскільки не сприяє підвищенню жаростійкості робочих поверхонь деталей двигуна.

© Ю.В. Дзядикевич, Ю.М. Петришин, М.Р. Башуцький, М.В. Буряк, 2023

Натомість підвищення жаростійкості деталей машин можливе шляхом формування на їх робочій поверхні композиції, що складається із дифузійної та нашарованої зон, у яких кожний окремих шар виконує визначену функцію. Наприклад, зовнішній, шлікерний шар забезпечує жаростійкість дифузійній композиції; бар'єрний – перешкоджає взаємодії дифузійної частини покриття з основою; дифузійний – сприяє релаксації напруги в покритті під час багаторазової зміни температурного режиму, а також покращує адгезію між дифузійною та нашарованою частинами композиційного покриття. Саме тому дослідження процесу формування композиційного покриття на деталях двигуна є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам дифузійного насичення сталевих деталей і особливостям проходження процесу борування присвячені праці багатьох вітчизняних вчених, зокрема: Г.В. Самсонова, Т.Н. Серебрякової, В.А. Неронова, Б.М. Рудь [1], С.А. Князева [2], Н.Е. Погребної, В.З. Куцовой, Т.В. Котової [3] О.Г. Добровольського, Б.В. Борисовича, В.А. Косенка [4]; О.М. Гур'єва, Б.Д. Лигденова, Н.А. Попової, Е.В. Козлова [5]; Б.Д. Лигденова, А.М. Гур'єва, В.І. Мосора, В.А. Бутуханнова [6]; Ю.А. Мікаеляна [7]; Б.П. Середи, Д.Б. Середи, І.О. Бабки, І.Е. Зими, І.В. Білозора [8].

Зокрема, Г.В. Самсонов [1] зазначає, що бориди тугоплавких металів мають високу тугоплавкість, високу хімічну стійкість у різних агресивних середовищах і високу електро-і теплопровідність. Ці властивості є підставою для використання їх як складову частину багатошарового композиційного покриття.

Для формування жаростійкого шару високотемпературної композиції можна використати також силіцидні сполуки, здатні формувати на поверхні металу самозаліковуючу оксидну плівку.

Досліджуючи процес борування високолегованої сталі марки 15Н11М, С.А. Князев встановив [2], що індукційне нагрівання реакційної зони із швидкістю 100° С/с зумовлює значне скорочення тривалості процесу насичення (з 3 годин до 2 хвилин), а при температурі 1160 °С на зразках формується двофазне боридне покриття товщиною 110 мкм. Було встановлено, що індукційне нагрівання сталевих зразків, покритих боридними пастами, дає змогу одержати на металевій поверхні твердий боридний шар товщиною 200 мкм. Це є альтернативою серед інших технологій хіміко – термічної обробки.

Важливим також є аналіз параметрів процесу насичення металів елементами впровадження, що підтверджує ефективність застосування хіміко-термічної обробки для підвищення експлуатаційних властивостей деталей [3].

О.Г. Добровольський, Б.В. Борисович, В.А. Косенко [4] вивчали процес борування сталевих деталей у герметизованих контейнерах в захисних газах або у вакуумі. Процес проводили при температурі 900-950°С тривалістю 4-6 годин. Процес є складним і дорогим. Водночас порівняння властивостей покритих деталей свідчить про перспективність процесу борування.

Заслуговує на увагу проведений детальний фазовий і структурний аналіз боридного покриття, одержаного за різними режимами [5]. Досліджено та встановлено основні закономірності та механізми борування і карбоборування сталевих зразків.

Перспективними є способи хіміко-термічної обробки [6], що дало змогу обґрунтувати можливі механізми формування фазового складу дифузійних покриттів при насиченні титаном, бором і хромом.

Микаелян Ю.А. не лише проаналізував існуючі способи борування металів і сплавів, а й розробив новий склад насичуючої суміші та режим хіміко-термічної

обробки, що забезпечило одержання достатньо глибокого і суцільного боридного шару на поверхні сталей [7].

Досліджено також і кінетику процесу одержання комплексного борохромоалітованого покриття на сталених зразках [8]. Встановлено, що при температурі процесу 105 °С за 60 хв. можна отримати борохромоалітовані покриття товщиною 45-80 мкм із мікротвердістю $15-17 \times 10^3$ МПа.

Однак, у літературних джерелах недостатньо висвітлено чинники, які впливають на процес формування на робочій поверхні деталей машин багатошарового покриття, яке має комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей. Це зумовило необхідність їх подальшого вивчення.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження закономірностей процесу формування на металевій основі багатошарової композиції, яка забезпечує високу жаростійкість деталей двигуна.

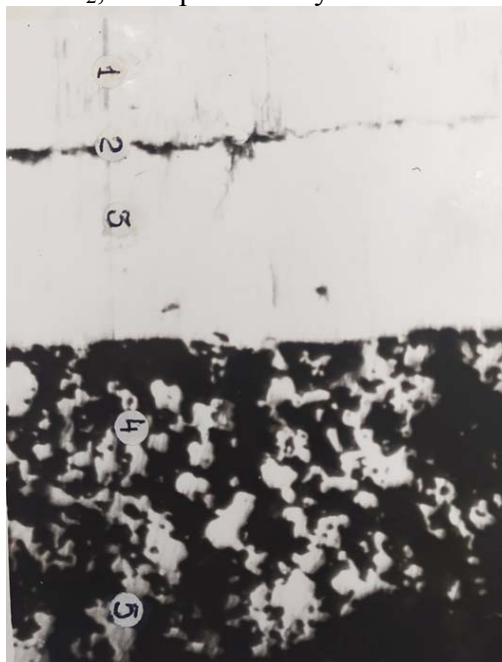
Виклад основного матеріалу дослідження. Вище проведені дослідження свідчать про те, що ресурс роботи боросиліцидного покриття на металевих деталях залежить від високотемпературної стабільності боридних фаз, оскільки вони сповільнюють перетворення силіцидних фаз $MeSi_2$ в Me_5Si_3 , а також від товщини силіцидного шару, який є обмежуючою ланкою при формуванні захисної плівки такої товщини, яка запобігає дифузії кисню в глибину металевої основи. Нанесення на леговані сталі боросиліцидного покриття з товщиною силіцидного шару більше 300 мкм є недоцільним, оскільки спостерігається його відшарування від металевої основи. Жаростійкість покриття можна підвищити шляхом застосування шлікерного методу, як для збільшення товщини покриття, так і введення більш жаростійких компонентів, наприклад, таких як дисиліцид молібдену і вольфраму.

З метою дослідження впливу різного роду добавок на процес формування захисного покриття на деталях машин, попередньо було сформовано боросиліцидне покриття, на яке було нанесено шар шлікера із дисиліцида молібдена товщиною 120 мкм. Для приготування суспензії використано порошок дисиліцида молібдена зернистістю менше 40 мкм. Боросиліцировані зразки з нанесеним силіцидним шаром спочатку просушували, а потім обпікали при 140⁰С протягом 15 хвилин. Металографічний аналіз покритих зразків показав, що запропонований технологічний режим забезпечує надійне закріплення шлікерного шару по всій поверхні дифузійного покриття. У випадку нанесення на боросиліцидовані зразки суспензії товщиною більше 120 мкм, то після термообробки спостерігається відшарування шлікерного покриття від боросиліцидної поверхні. Отже, товщина шлікерного шару покриття не повинна перевищувати 120 мкм.

Попередньо проведені дослідження показали, що підвищення температури експлуатації дифузійно-шлікерної композиції вище 1400⁰С призводить до різкого зменшення ресурсу роботи покриття у зв'язку з втратою дисиліцидом молібдена захисних властивостей. Підвищити опір окисленню шлікерної частини покриття можливо шляхом уведення в покриття компонентів, які мають високу температуру плавлення, низьку пружність парів дисоціації, не утворюють легкоплавких сполук із елементами, що входять, як у склад окислювального середовища, так і в склад захисного покриття. Таким вимогам задовольняють: оксид цирконію, гафнію, ітрію, алюмінію та ін. Ураховуючи це, для розробки високотемпературної композиції як наповнювач доцільно використати цирконієво-ітрієву кераміку ЦІС-2. Основою може слугувати дисиліцид молібдену, який забезпечує надійне закріплення композиції на поверхні спеченого силіцидного шару. Необхідно зауважити, що шлікерне покриття повинно мати хорошу покривну датність. У зв'язку з тим, у склад силіцид-оксидної

композиції необхідно ввести речовину, яка має хороші клеючі властивості. Такою речовиною може бути натрій алюмінат, який також відповідає вимогам, що висуваються до компонентів наповнювача.

Попередньо проведені нами досліді щодо вибору інгредієнтів композиції показали, що використання в суміші, менше 60% MoSi_2 погіршує закріплення високотемпературного шару. Встановлено, що найбільш якісним є перший шлікерний шар товщиною до 250мкм, який містить (мас.%) MoSi_2 -60, ЦІС-2 -30, і NaAlO_2 -10. Металографічний аналіз покритих зразків показав, що багатошарове шлікерне покриття – це композиція на основі MoSi_2 , яка армована тугоплавкими оксидами (рис.1).



1 – основа; 2 – MoB ; 3 – MoSi_2 ; 4 – силіцидна суміш; 5 – суміш оксидів

Рисунок 1 – Мікроструктура багатошарового покриття на легованій молібденом сталі, $\times 400$. Травлення. $\text{HF}:\text{H}_2\text{SO}_4=1:1:1$

Джерело: розроблено авторами

З метою підвищення жаростійкості та ресурсу роботи багатошарової композиції кожний її наступний її шар містив на 20% більше оксидної кераміки за рахунок зменшення кількості дисиліцида молібдена

Сформульовані технологічні основи одержання високотемпературних багатошарових покриттів можуть розповсюджуватися і на неметалеві матеріали, зокрема, графіт, бориди, оксиди, силіциди і карбіди. Одним із її напрямів є підвищення жаростійкості виробів із карбіда кремнію шляхом нанесення на їх поверхню захисного шару. Для формування покриття використовують суспензію, що містить 80 % карбіду кремнію і 20 % високоякісного бентоніту, яку відпалюють на повітрі при 1300°C . Покриття надійно захищає керамічну конструкцію від високотемпературної газової корозії. При експлуатації кераміки в області високих температур наявність нез'язаного кремнію призводить до утворення значної кількості SiO_2 . Підвищити жаростійкість карборундових конструкцій можливо шляхом нанесення на їх поверхню газонепроникного шару із карбіду кремнію товщиною 100 мкм. Водночас необхідно зазначити, що цей спосіб дуже складний у технологічному оформленні.

Отже, запропонована обробка співпадає із технологічною рекомендацією щодо формування багатошарового покриття.

Рентгенофазовий аналіз борованої кераміки показав, що після обробки вона містить також бориди кремнію: SiB_4 і SiB_6 . Встановлено, що багатошарове покриття мало чутливе до перегріву. Високий опір окисленню забезпечується завдяки утворенням плівки, що містить низку тугоплавких оксидів. На підставі проведених дослідів було встановлено, що ефективний захист металевої конструкції можливий у тому випадку, якщо попередньо на металеву конструкцію нанести багатошарову композицію, компоненти якої мають високу температуру плавлення, низьку пружність дисоціації, не утворюють при температурі експлуатації летких і легкоплавких сполук, а також створення на їх поверхні захисної плівки шляхом попереднього високотемпературного окислення. Розроблені технологічні регламенти процесу нанесення на деталі машин захисного покриття дозволяють витримувати перегрівання в декілька сотень градусів.

Висновки. На підставі узагальнення та аналізу результатів робіт, присвячених проблемі підвищення жаростійкості елементів конструкцій машин встановлено, що перспективним захистом їх від високотемпературного окислення є багатошарова композиція. Вивчення процесу формування на деталях машин шлікерного композиційного покриття показало, що боридні фази стосовно металевої основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних, силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття. Таке покриття слід застосовувати для виготовлення деталей високотемпературної техніки.

Список літератури

1. Knyazev S.A. Features of structure formation of surface layers with high content of boron S.A on steel 15X11MF in the conditions of furnace and induction heating. *Ceramics: science and life*. 2020. № 2(47). p. 26–30.
2. Биковський О.Г. Зварювання, різання й контроль якості під час виробництва металоконструкцій: підручник. К.: Основа, 2021. 400 с.
3. Вплив агресивних середовищ на експлуатаційні характеристики матеріалів несучих конструкцій колісних транспортних засобів / М.В. Буряк та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023 Вип. 7(38), ч.І. С. 143 - 150.
4. Дзяди́кевич Ю.В. Захист елементів двигунів транспортних засобів від окислення: технологічний аспект / Ю.В. Дзяди́кевич та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023 Вип. 7(38), ч.І. С. 151 - 159.
5. Добровольський О.Г., Борисович Б.В., Косенко В.А. Борування – ефективний спосіб захисту деталей від абразивного зношення. *ГБДММ*. 2012. №79. С. 73–78.
6. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: навч. посіб. Дніпро: НМетАУ, 2021. 89 с.
7. Лигденюв Б.Д., Гур'єв А.М., Мосоро В.І., Бутуханов В.А. Перспективні дифузійні покриття : монографія. Lulu Press . 2015. 131 с.
8. Отримання борованих покриттів в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу для деталей газорозподільного механізму двигунів внутрішнього згорання автомобілів / Б.П. Серета та ін. *ДДТУ : зб. наук. праць*. 2021. Т. 1, № 38. С.60-64.
9. Рудченко О.Ю., Поліщук О.М. Механізм державного регулювання транспортної інфраструктури мегаполісів. *Університетські наукові записки*. 2017. № 6. С. 93-100.
10. Січкач Д. Транспортна галузь у 2020 році. *Європейської Бізнес Асоціації*: веб-портал. 2020, 22 грудня. URL: <https://eba.com.ua/transportna-galuz-u-2020-rotsi/> (дата звернення: 08.05.2022).

Reference

1. Knyazev, S.A. (2020). Features of structure formation of surface layers with high content of boron S.A on steel 15X11MF in the conditions of furnace and induction heating. *Ceramics: science and life*, 2(47), p.26–30 [in English].

2. Bykovs'kyy, O.H. (2021). *Zvaryuvannya, rizannya y kontrol' yakosti pid chas vyrobnytstva metalokonstruktsiy [Welding, cutting and quality control during the production of metal structures]* . Kyiv: Osnova [in Ukrainian].
3. Buryak, M.V. et al. (2023). Vplyv ahresyvnykh seredovyshch na ekspluatatsiyni kharakterystyky materialiv nesuchykh konstruktsiy kolisnykh transportnykh zasobiv [The influence of aggressive environments on the operational characteristics of materials of load-bearing structures of wheeled vehicle]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 7(38), part. I*, 143- 150 [in Ukrainian].
4. Dzyadykevych, Yu.V. et al. (2023). Zakhyst elementiv dvyhuniv transportnykh zasobiv vid okyslennya: tekhnolohichnyy aspekt [Protection of vehicle engine elements from oxidation: technological aspect] . *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 7(38), part. I*, 151- 159 [in Ukrainian].
5. Dobrovol's'kyy, O.H., Borysovykh, B.V. & Kosenko, V.A. (2012). Boruvannya – efektyvnyy sposib zakhystu detaley vid abrazyvnoho znoshennya [Boring is an effective way to protect parts from abrasive wear]. *HBDMM – GBDMM, 79*, 73–78 [in Ukrainian].
6. Pohrebna, N.E., Kutsova, V.Z. & Kotova, T.V. (2021). *Sposoby zmitsnennya metaliv [Methods of strengthening metals]*. Dnipro: NMetAU [in Ukrainian].
7. Lyhdenov, B.D., Hur'yev, A.M., Mosoro, V.I. & Butukhanov, V.A. (2015). *Perspektyvni dyfuziyni pokryttya [Promising diffusion coatings: monograph]*. Lulu Press [in Ukrainian].
8. Sereda, B.P., Sereda, D.B., Babko, I.O., Zyma, I.E. & Bilozor, I.V. (2021). Otrymannya borovanykh pokryttiv v umovakh samorozpovsyudzhuval'noho vysokotemperaturnoho syntezu dlya detaley hazorozpodil'noho mekhanizmu dvyhuniv vnutrishn'oho z'horannya avtomobiliv [Obtaining boron coatings in the conditions of self-propagating high-temperature synthesis for parts of the gas distribution mechanism of internal combustion engines of cars.]. *DDTU : zb. nauk. prats' – Coll. of science works of DDTU, Vol. 1,38*, 60-64[in Ukrainian].
9. Rudchenko, O.Yu. & Polishchuk, O.M. (2017). Mekhanizm derzhavnoho rehulyuvannya transportnoyi infrastruktury meghopolisiv [The mechanism of state regulation of the transport infrastructure of megacities]. *Universytet-s'ki naukovi zapysky – University scientific notes, 6*, 93-100 [in Ukrainian].
10. Sichkar, D. (2020). Transportna haluz' u 2020 rotsi. Veb-portal Yevropeys'koyi Biznes Asotsiatsiyi. 22 hrudnya [Transport industry in 2020. European Business Association: web portal. 2020, December 22]. *eba.com.ua*. Retrieved from <https://eba.com.ua/transportna-galuz-u-2020-rotsi/> [in Ukrainian].

Yuriy Dzyadykevich, Prof., DSc., **Yury Petryshyn**, post-graduate, **Mihayno Bashutskyi**, post-graduate, **Mykola Buryak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Research on Protection of Car Parts from High-temperature Oxidation

The article is devoted to the problem of investigating promising directions for protecting machine parts from high-temperature oxidation through the formation of a multilayer composition.

Analyzing the results of conducted research on increasing the heat resistance of machine structural elements, it can be concluded that a multilayer composition is a promising protection against high-temperature oxidation. The study of the process of forming a slurry-based composition coating on machine parts has shown that boride phases are more stable compared to silicide phases with respect to the metallic substrate. The formation of boride-silicide and silicoboride phases at the interface ensures high stability of the borosilicide coating, making it suitable for manufacturing machine parts that are exposed to high temperatures.

Based on the generalization and analysis of the results of works devoted to the problem of increasing the heat resistance of the elements of machine structures, it was established that a promising protection against high-temperature oxidation is a multilayer composition. The study of the forming process on the parts of the slip-composite coating machines showed that the boride phases are more stable in relation to the metal base than the silicide phases. Due to the formation of boride and silicide, silicoboride phases at the border, high stability of the borosilicide coating is ensured. Such a coating should be used for the manufacture of high-temperature equipment parts.

boronizing process, multi-layer compositions, high-alloy steel, improvement of operational properties of parts

Одержано (Received) 10.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 17.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

В.Б. Захарчук, асп., В.В. Кудінов, асп., І.В. Кудінов, асп., В.В. Бірючинський асп.
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

Вплив експлуатаційних факторів на залишковий ресурс металоконструкцій колісних транспортних засобів

Стаття присвячена проблемі дослідження впливу експлуатаційних факторів на залишковий ресурс металоконструкцій колісних транспортних засобів.

Класичні методи розрахунку та експериментальної оцінки тривалості служби на етапі появи втомних тріщин у конструкційних системах базуються на припущенні про цілісність матеріалів і неприпустимість виникнення втомних пошкоджень у найбільш критичних перетинах конструкції. Ці підходи не забезпечують адекватного прогнозування ресурсу машини, тому необхідно використовувати принципи механіки руйнування

корозія, агресивне середовище, корозійне руйнування, навантаження, місцева корозія, тріщини

Постановка проблеми. Корозія металевих компонентів автомобілів має значний вплив на її надійність та тривалість служби. Руйнування, спричинене поєднанням корозії та експлуатаційного навантаження, є результатом складних факторів, які можна поділити на внутрішні та зовнішні. Внутрішні фактори традиційно розглядають як залежні від хімічного складу матеріалів. Зовнішні фактори включають корозійне пошкодження, спричинене зовнішнім середовищем, таким як атмосферні впливи, методи експлуатації та зберігання. Волога, мінеральні добрива та їх поєднання значно скорочують ресурс конструкційних елементів сільськогосподарської техніки, особливо при пошкодженні захисних покриттів. Корозійні пошкодження та корозійно-втомні тріщини формуються на поверхнях несучих вузлів металевих конструкцій, і вони можуть рости до критичних розмірів, що призводить до виникнення аварійних ситуацій. Варто зазначити, що швидкість росту корозійно-втомних тріщин набагато вища, ніж швидкість росту звичайних втомних тріщин у тих же металевих матеріалах. Це зменшує ресурс (залишковий ресурс) металевих компонентів колісних транспортних засобів, що потрібно враховувати при їх проектуванні. Важливо дослідити вплив корозійно-агресивних середовищ (мінеральні і органічні добрива, корозійно-активні ґрунти та інші) на втомне руйнування [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливе значення має вирішення проблеми протикорозійного захисту колісних транспортних засобів у автотранспортному секторі. Існує насущна потреба в проведенні всебічних досліджень щодо корозійного пошкодження, корозійної втоми і корозійно-механічного зносу, чому присвятили свої наукові праці низка вітчизняних учених, таких як Севернева М. М., Северного А. З., Меламеда М. Н., Поповича П.В. та ін. В даних наукових працях науковців були визначені загальні принципи для системи збереження машинно-тракторного парку колісних транспортних засобів. Були запропоновані процедури та практичні підходи, що дозволяють здійснювати заходи щодо захисту несучих конструкцій автотранспортної техніки від корозії. [3, 5]. Проте, щодо розрахунків металоконструкцій при впливі агресивних дорожніх середовищ, існує недостатньо вивчених даних і розробок.

Постановка завдання. При використанні органічних та мінеральних добрив, застосуванні отрутохімікатів для боротьби зі шкідниками та обробці полів, на поверхні конструкцій утворюється пил, що містить хімічні речовини. При взаємодії цього пилу з вологою, створюється агресивне середовище, що спричиняє інтенсивну корозію. Швидкість виникнення корозійних процесів залежить від агресивності навколишнього середовища, тривалості його впливу, температури повітря, стану металевої поверхні, хімічного складу металу, наявності механічного напруження та особливостей конструкції. Корозія деталей сільськогосподарської техніки в атмосферних умовах може значно посилюватись, якщо є залишки мінеральних і органічних добрив, отрутохімікатів або контакт з ґрунтом. Найглибші пітінги виникають при корозії деталей у нітрофосці та мідному купоросі. З органічних добрив, торфові компости є найбільш корозійно активними, тоді як екскременти корів і гній на їх основі є менш корозійно активними, а також низовинний і верховий торф. Наявність бруду, який залишається після очищення машин, в умовах вологості стає хімічно активним і прискорює процеси корозії. Бруд на деталях сприяє збільшенню корозії, оскільки разом з вологою створюється активне електрохімічне середовище, що сприяє більш інтенсивній корозії. Корозія особливо небезпечна для деталей, що піддаються динамічним навантаженням, таким як пружини, пружинні лапки культиваторів, осі, вали тощо. Термін служби цих деталей часто скорочується на 40-60% через втомні руйнування. При аналізі поломок деталей, наприклад, лапок культиватора, валів тощо, виявлено, що багато з них починаються з ознак корозії і пітінгу. Особливо небезпечні руйнування внутрішніх поверхонь ємностей для отрутохімікатів з тонколистової сталі.

У нормативних документах, що стосуються експлуатації металевих конструкцій, не встановлені належні норми для припустимого рівня корозійних пошкоджень та зменшення несучої здатності конструкційних елементів. Це ускладнює визначення нормативних термінів експлуатації, оцінку межового стану металевих конструкцій та планування витрат на виробництво та ремонтні роботи.

При розробці методів визначення залишкового ресурсу та залишкової міцності елементів конструкцій, які піддаються корозійному та втомному руйнуванню, необхідно проводити дослідження стійкості конструкційних сталей до корозійних тріщин та зон зварних з'єднань металевих конструкцій.

Виклад основного матеріалу. Основним показником стійкості матеріалу до корозійного пошкодження є діаграма корозійного розтріскування. Дана діаграма описує взаємозв'язок між швидкістю зростання тріщини та коефіцієнтом інтенсивності напружень і вказує на стійкість металів до тріщиностійкості у корозійному середовищі, незалежно від того, чи це статичне навантаження, чи циклічне навантаження.

Вивчення закономірностей росту корозійно-втомних тріщин залежить від впливу факторів, таких як метал-середовище, коефіцієнт асиметрії циклу R , частота навантаження f , форма циклу навантаження, температура випробувань, рівень здатності до зовнішньої поляризації E_p і т.д. Для системи "низькоміцна сталь - водневе середовище" зменшення частоти навантажень сприяє розвитку тріщин у діапазоні високих значень коефіцієнта інтенсивності напружень, але в припороговій області спостерігається зменшення швидкості росту тріщин. Частотний ефект зазвичай не має впливу на швидкість процесу руйнування високоміцних сталей у відкритому повітрі, але має значний вплив у корозійних середовищах. Зниження частоти навантаження призводить до прискорення росту корозійно-втомних тріщин у низькоміцних сталях, особливо при середніх рівнях коефіцієнта інтенсивності напружень. Однак, залежність між частотою і пороговими значеннями коефіцієнта інтенсивності напружень в корозійному середовищі має складний характер, досягаючи максимальної значимості при певній проміжній частоті.

Катодна поляризація є значним фактором, який впливає на кінетичні діаграми корозійно-втомного руйнування і сприяє формуванню областей, що характеризуються діаграмами корозійного розтріскування. При вивченні кінетичної кривої втомного руйнування сталевих труб за умов катодної поляризації спостерігається стабільне плато, де швидкість росту тріщини V залишається постійною. Зниження частоти навантаження призводить до збільшення висоти плато і тривалості його існування. Одна з особливостей визначення корозійно-циклічної тріщиностійкості матеріалів полягає в унікальній електрохімічній ситуації на вершині тріщини, яка відрізняється від умов на поверхні зразка. Ступінь цієї відмінності залежить від довжини тріщини, напружено-деформованого стану в вершині, часу впливу середовища, потенціалу зовнішньої поляризації та інших факторів. Тому, вплив середовища на утворення передруйнування в області вершини тріщини і, відповідно, його вплив на процес корозійно-втомного руйнування металу може бути різним.

З метою встановлення високої точності визначення необхідних характеристик циклічної тріщиностійкості матеріалу в певному корозійному середовищі, у літературі широко використовується модель [6]. Згідно з цією моделлю, Три параметри характеризують зону передруйнування матеріалу, що піддався деформації в вологому корозійному середовищі: найвище значенням КІН циклу K_{max} ; значеннями показника вологості середовища pH ; показник електродного потенціалу металу φ_B у вершині тріщини. При таких умовах рост тріщини в металі під впливом водного корозійного середовища визначається відомою із досліджень А. Панасюка., О. Андрейківа, І. Дмитраха, та інших функцією (1):

$$V = f(C_i, K_{max}, pH, \varphi_B), \quad (1)$$

де C_i – коефіцієнт, що визначає стійкість матеріалу до циклічної тріщиностійкості;

i – кількість невідомих для опису системи "матеріал-середовище" ..

В процесі поширення корозійно-втомної тріщини, для кожної швидкості росту тріщини, яка відображається на кінетичній діаграмі втомного руйнування, відповідають певні електрохімічні умови в області вершини тріщини. Ці умови залежать від початкового електрохімічного стану, коли тріщина тільки починає формуватися, а також від тривалості впливу середовища та швидкості утворення нової поверхні [8,7]. Отже для отримання достовірних даних про швидкість росту тріщини і корозійного середовища, а також для забезпечення інваріантності кінетичних діаграм втомного руйнування, необхідно забезпечити однакові електрохімічні умови у вершині тріщини по ходу її росту. тобто $\varphi_B = const$, $pH = const$.

У реальній конструкції зміна значень pH і інших параметрів пов'язаних з експлуатацією може мати випадковий характер. Це створює проблему при розрахунках на довговічність, оскільки потрібно вибрати базову діаграму втомного руйнування для конкретної системи "метал-середовище". Цю задачу можна вирішити шляхом побудови інваріантних діаграм, які відповідають крайовим електрохімічним станам у вершині корозійно-втомної тріщини.

Також, параметри навантаження мають вплив. У більшості конструкційних сплавів, що піддаються циклічним навантаженням та діють у робочих середовищах під час експлуатації, процес корозійно-втомного руйнування може відбуватися за механізмом корозійної втоми або корозійно-втомної руйнування під впливом напружень, залежно від конкретних умов навантаження.

Вплив фізико-хімічних факторів. Під час дослідження процесу зростання корозійно-втомних тріщин у різних середовищах, таких як кислий розчин NaCl, повітря і силіконове масло, було встановлено, що поріг циклічної тріщиностійкості для трьох типів нержавіючої сталі – аустенітної, аустенітно-феритної і мартенситної, залежить від агресивності середовища. Для кожного типу сталі максимальне значення порогу досягається у присутності силіконового масла. Порівняно з повітрям, рівень порогового значення інтенсивності напружень (КІН) зростає в маслі, оскільки збільшується розмір пластичної зони і, відповідно, зростає тріщиностійкість. Для системи високоміцної сталі - дистильована вода виявлено, що відсутність кисню води прискорює ріст тріщин при середніх значеннях КІН, але не має впливу на низько- і високоамплітудні навантаження. Застосування зовнішньої катодної поляризації дає аналогічний результат, але в хлоридному розчині спостерігається прискорене зростання тріщин навіть при низьких значеннях КІН. Підвищення температури випробувань у діапазоні 25...85°C, особливо у високоамплітудній області, є важливим фактором, що збільшує інтенсивність руйнування. Ефект впливу температури на швидкість росту тріщин значно залежить від частоти навантаження і досягає піку в середньому діапазоні частот, що вивчаються ($f = 1 \text{ Гц}$) [6, 7].

Вплив корозійних факторів на тріщиностійкість матеріалів можна розглядати з трьох основних механізмів: адсорбційного зменшення міцності, водневого окрихчення та хімічного розчинення. Адсорбція активних речовин на поверхні матеріалу у зоні тріщини спричиняє зниження поверхневої енергії та полегшує процес руйнування (ефект Ребіндера). Одним із основних процесів, який сприяє докритичному росту тріщини і призводить до поломок, є окрихчення невеликої області навколо вершини тріщини. Атомарний водень, що завжди присутній в чистому вигляді або зв'язаний з молекулами, може дифундувати у всі метали. Розчинність водню при нормальних умовах складає від 10 до 100 см³ на 1 кг металу. Окрихчення вже спостерігається при концентрації 2 см³/1 кг металу, а при 10 см³/1 кг стає небезпечним. Місця з неохороненою окисною плівкою на нових поверхнях є найбільш вразливими для проникнення водню в метал [6, 7].

Аналіз ушкоджень автомобільної техніки, спричинених корозією, показав, що близько 20-25% машин зазнають втрати міцності через поєднання атмосферної корозії та механічних навантажень, які виникають під час робочих перевантажень. Незважаючи на поширені корозійні пошкодження металоконструкцій, пітингу та інших видів корозії, терміни служби компонентів і агрегатів сільськогосподарської техніки встановлюються без врахування впливу поєднаних корозійно-активних середовищ та умов експлуатації. З позиції корозійно-втомних ушкоджень, найбільш небезпечними є добрива та отрутохімікати.

Під час експлуатації розкидачів добрив і сільськогосподарських транспортних засобів на елементи несучих систем діють випадкові та складні комбінації силових впливів, що зумовлені випадковими джерелами збурень. У спектрах цих випадкових процесів навантаження виділяються три гармоніки з частотами в діапазонах 1,4-1,8 Гц, 4-5 Гц та 8-9 Гц. Приблизно 80% енергії випадкових процесів зосереджено в діапазоні частот 1-3,5 Гц [8, 10, 11].

Висновки. Ряд активності корозії мінеральних добрив відрізняється в залежності від глибини пітингів і втрати маси. Корозійні пошкодження, що виникають у середовищі мінеральних добрив, варіюються для кожного виду добрива і матеріалу. Деякі добрива піддаються рівномірній корозії, тоді як у інших переважає місцева корозія з утворенням глибоких пітингів, що часто приводить до руйнування деталей, незважаючи на загально незначну корозію. В обох випадках найбільш активними з точки зору корозії є такі мінеральні добрива як сульфат амонію та нітрофоска.

Загальноприйняті методи оцінки тривалості життя на етапі утворення втомних тріщин в конструкційних системах передбачається на основі припущення про однорідність матеріалів і неприпустимість появи втомних пошкоджень у найнебезпечніших перетинах конструкційних елементів.

Ці підходи, зокрема при використанні циклічних навантажень у вразливих середовищах, в умовах високих залишкових напружень і наявності корозійних пошкоджень, які призводять до пітингу на початкових етапах експлуатації машин, не забезпечують достатньо точного прогнозування ресурсу машини. У випадках, коли тривалість служби конструкції визначається швидкістю розвитку корозійно-втомних тріщин, потрібно використовувати принципи механіки руйнування.

Список літератури

1. Бакалець Д.В. Савуляк В.І. Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин. *Технічні науки : збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2012. Вип. 11(66), т. 2. С. 302 – 306.
2. Похмурский В. И., Хома М.С. Коррозійна втома металів і сплавів. Львів : Сполом, 2008. 299 с.
3. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. / О.Н. Романив та ін., К.: Наукова думка, 1990. 680 с.
4. Попович П.В. Методи оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивних середовищ : дис. д-ра техн. наук: 05.05.11 / Тернопільський державний технічний ун-т ім. Івана Пулюя. Тернопіль : ТНТУ, 2015. 425 с.
5. Макаренко М. Пітинг та інші загрози міжсезоння. *Агробізнес сьогодні*. 2012. № 22. 245с.
6. Аналіз надійності несучих систем тракторних причепів [Електронний ресурс] / Т.І. Рибак та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 151. С. 18-20.
7. Кузмицька А.І., Бісик С.П., Бондаренко О.В. Корозійна стійкість матеріалів протимінних екранів та внутрішнього протиосколкового захисту бойових броньованих машин. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки : Тези доповідей на VII науково-технічній конференції 09–10 жовтня 2019 року, м. Київ*. С. 178–179.
8. Захист від корозійних ушкоджень озброєння та військової техніки / О.І. Сиза, О.М. Савченко, О.О. Корольов, С.С. Гута. *Збірник наукових праць Державного науководослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2022. Вип. 2(12). С. 119–126.
9. Інгібітори корозії для захисту поверхні обладнання військової техніки / О.М. Савченко та ін. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022): матеріали тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня)*. 2022 р., м. Чернігів). Чернігів: ЧНТУ, 2022. С. 223–224
10. Popovich P.V., Slobodyan Z.B. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska / P.V.Popovich, *Materials Sciences*. 2014. Vol. 49, 6, P.819-826.(Scopus).
11. Barna R.A., Popovich P.V. Influence of Operating Media on the Fatigue Fracture of Steels for Elements of Agricultural Machines. *Materials Sciences*. 2014. Vol. 50, 3, P.377-380.(Scopus).

Reference

1. Bakalets', D.V. & Savulyak, V.I. (2012). Pidvyshchennya nadiynosti ta vidnovlennya metalokonstruktsiy transportnykh ta sil's'kohospodars'kykh mashyn [Increasing the reliability and restoration of metal structures of transport and agricultural machines.]. *Tekhnichni nauky : zbirnyk naukovykh prats' Vinnyts'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu – Technical sciences: a collection of scientific works of the Vinnytsia National Agrarian University, Issue 11(66), Vol. 2, 302 – 306* [in Ukrainian].
2. Pokhmursky, V.Y. & Khoma, M.S. (2008). *Koroziyna vtoma metaliv i splaviv* [Corrosion fatigue of metals and alloys]. L'viv : Spolom [in Ukrainian].
3. Romanyv, O.N., Yarema, S.Ya., Nykyforchyn, H.N., Makhutov, N.A. & Stadnyk, M.M. (1990). *Ustalost' y tsyklycheskaya treshchynostoykost' konstruksionnykh materyalov* [Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials.]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
4. Popovych, P.V. (2015). *Metody otsinky resursu nesuchykh system prychipnykh mashyn dlya vnesennya dobrov z vrakhuvanniam vplyvu ahresyvnykh seredovyshech* [Methods of evaluating the resource of the

- load-bearing systems of trailed machines for applying fertilizers, taking into account the influence of aggressive environments]. *Doctor's thesis*. Ternopil' TNTU [in Ukrainian].
5. Makarenko, M. (2012). Pitynh ta inshi zahrozy mizhsezonna [Piting and other off-season threats]. *Ahrobiznes s'ohodni – Agribusiness today*, 22, 245 [in Ukrainian].
 6. Rybak, T.I. Popovych, P.V., Hrytsay, Yu.V. & Rubinets', N. (2014). Analiz nadiynosti nesuchykh system traktornykh prycheviv [Analysis of the reliability of the load-bearing systems of tractor trailers]. *Visnyk Kharkivskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka – Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Issue 151*, 18-20 [in Ukrainian].
 7. Kuzmyts'ka, A.I., Bisyk, S.P. & Bondarenko, O.V. (2019). Koroziyna stiykist' materialiv protymynnykh ekraniv ta vnutrishnoho protyoskolkovoho zakhystu boyovykh bron'ovanykh mashyn [Corrosion resistance of anti-mine screen materials and internal anti-fragmentation protection of combat armored vehicles.]. Problems of coordination of military-technical and defense-industrial policy in Ukraine. Prospects for the development of weapons and military equipment: *VII Naukovo-tekhnichna Konferentsia (09–10 zhovtnya 2019 roku, m. Kyiv) – VII Scientific and Technical Conference* (pp. 178–179). Kyiv [in Ukrainian].
 8. Syza O.I. O.M. Savchenko, O.O. Korol'ov, S.S. Huta (2022). Zakhyst vid koroziynykh uskodzhen' ozbroynnykh ta viys'kovoyi tekhniki [Protection against corrosion damage of weapons and military equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovodoslidnoho instytutu viprobuvan' i sertyfikatsiyi ozbroynnykh ta viys'kovoyi tekhniki – Collection of scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Issue 2(12)*, 119–126 [in Ukrainian].
 9. Savchenko, O.M., Syza, O.I., Horodys'ka, O.V., Heyko, V.V. & Huta, S.S. (2022). Inhibitory koroziyi dlya zakhystu poverkhni obladnannya viys'kovoyi tekhniki [Corrosion inhibitors for surface protection of military equipment]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2022): XII Mizhnarodnf naukovo-praktychna konferentsia (26–27 travnya 2022 r., Chernihiv) – XII international scientific and practical conference* (pp. 223-224). Chernihiv: CHNTU [in Ukrainian].
 10. Popovich, P.V. & Slobodyan, Z.B. (2014). Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska. *Materials Sciences. Vol. 49, 6*. P.819-826 [in English].
 11. Barna, R.A. & Popovich, P.V. (2014). Influence of Operating Media on the Fatigue Fracture of Steels for Elements of Agricultural Machines. *Materials Sciences. Vol. 50, 3*, P.377-380 [in English].

Vasyl Zakharchuk, post-graduate, **Valery Kudinov**, post-graduate, **Ihor Kudinov**, post-graduate, **Vitaly Biryuchinsky**, post-graduate

West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Influence of Operational Factors on the Remaining Resource of Metal Structures of Wheeled Vehicles

The article is devoted to the problem of researching the influence of operational factors on the residual resource of metal structures of wheeled vehicles.

Corrosion of metal structures of wheeled vehicles significantly reduces the resource and reliability of vehicles. Failure due to the combined action of corrosion and operational loads is caused by complex factors that can be divided into internal and external. Internal - traditionally considered as dependent on the chemical composition. External factors include corrosive destruction due to the external environment, which includes: atmospheric exposure, methods of operation and storage. The influence of moisture, mineral fertilizers and their combinations significantly reduces the resource of the structural elements of agricultural machines, especially when the protective coating is damaged. Corrosion damage is formed on such surfaces of load-bearing nodes of metal structures, corrosion-fatigue surface cracks are born, which grow to critical sizes, and there is a danger of machine failure.

Classical methods of calculation-experimental assessment of durability at the stage of initiation of fatigue cracks in structural systems are based on the assumption of integrity of materials and the inadmissibility of fatigue damage in the most dangerous intersections of structural elements. These approaches do not provide adequate forecasting of the machine's resource, so it is necessary to apply the provisions of the mechanics of destruction.

corrosion, aggressive environment, corrosion destruction, load, local corrosion, cracks

Одержано (Received) 05.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 656.13

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.165-180](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.165-180)**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***О.Л. Ляшук**, проф., д-р техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна***А.В. Гриньків**, ст. дослідник, канд. техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна***В.З. Гудь**, проф., д-р техн. наук, **В.О. Тесля**, доц., канд. техн. наук*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна**e-mail: AulinVV@gmail.com, e-mail: oleglashuk@ukr.net*

Теоретико-методичні засади підвищення ефективності використання парку машин в регіональних транспортних системах та підприємствах на основі лізингових відносин

В даній роботі розглядається проблема технічної та економічної ефективності придбання нових транспортних машин автотранспортними підприємствами регіону купівлею та за допомогою лізингових відносин з метою підвищення їх продуктивності і працездатності. Показано, що є необхідність у створенні теоретико-методичних засад лізингу транспортних машин, як одного із способів переоснащення системи машин в регіонах України та підвищення ефективності їх використання на основі лізингових відносин. Обґрунтовано, що при розробці засад доцільно базуватися на системі підвищення технічного стану машин відповідною стратегією їх технічного обслуговування і ремонту. Побудовано структурну схему системи транспортних машин регіону та автотранспортних підприємств, які мають модульну структуру рухомого складу.

транспортна машина, теоретико-методичні засади, лізинг, технічне обслуговування і ремонт, транспортна система, автотранспортне підприємство, технічний стан, ефективність використання

Постановка проблеми. Розвиток транспортної стратегії України пов'язаний з великомасштабним будівництвом опорно-транспортних мереж регіонів і великих муніципальних підприємств, які вимагають використання різних видів техніки, в тому числі і парків транспортних машин (ТМ). Складність реалізації даної стратегії полягає в тому, що існуючі парки ТМ включають машини, що мають критичний рівень фізичного і морального зносу [1]. Тенденція старіння основних видів ТМ пояснюється наявністю великої кількості дрібних автотранспортних підприємств (АТП), що мають парки таких машин і в силу фінансового становища не мають можливості купувати сучасну високопродуктивну техніку. Крім того, за роки реформ відбулося падіння обсягів виробництва ТМ.

Все це значно ускладнює організацію виробництва з технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) парків ТМ і вимагає вдосконалення методів управління їх технічним станом. У міру розвитку методів і засобів технічної діагностики стратегія ТО і Р ТМ

повинна більшою мірою орієнтуватися на поточний стан елементів машин. Підвищення ефективності роботи парків ТМ в значній мірі залежить від подальшого вдосконалення організації виробництва з їх ТО і Р на основі застосування засобів і методів технічної діагностики та нових технологій обробки інформації, спрямованої на оптимізацію управлінських рішень для підтримки працездатності машин [2, 3]. Під організацією розуміють сукупність дій, що ведуть до стійкої взаємодії всіх елементів системи забезпечення працездатності машин, а управління виступає як функція цієї системи, що забезпечує вдосконалення її структури для досягнення поставлених цілей [4]. У зв'язку з цим питання вдосконалення організації виробництва з ТО і Р парків машин і управління технічним станом та ефективним використанням ТМ є безумовно актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення продуктивності і працездатності ТМ – одна з найважливіших умов розвитку економіки України в цілому. Одним з основних факторів досягнення істотного підвищення продуктивності праці в транспортних системах регіонів України є технічне переозброєння і оновлення машинних парків шляхом впровадження нової високопродуктивної техніки, в т.ч. зарубіжного виробництва. Однак підвищення ефективності роботи раціональних транспортних систем в значній мірі залежить і від поліпшення використання потенціалу наявних засобів механізації [5]. Ринкові відносини зумовлюють пошук нових підходів до організації технічної експлуатації і стратегій управління парками машин за рахунок подальшого вдосконалення системи ТО і Р ТМ.

Зазначимо, що забезпечення працездатності та підвищення ефективності використання парків машин істотно відрізняються від аналогічних проблем по окремих машинах. Складність даної проблеми полягає в тому, що немає достатньо повної теорії, яка висвітлює питання забезпечення працездатності парків машин. В той час є передумови до створення такої теорії: глибоке висвітлення питань забезпечення працездатності окремих машин; розвиток теоретичних аспектів застосування технічної діагностики; поява сучасних інформаційно-аналітичних методів управління, в т.ч. управління станом транспортних та технічних систем [6, 7].

Сучасні парки ТМ регіональних транспортних систем неоднорідні за своїм складом: вони включають досить багато одиниць фізично і морально застарілої техніки, а також високопродуктивні машини зарубіжного виробництва. Зростання різномодельності і різнотипності парків ТМ значно ускладнює організацію їх ТО і Р [2, 4].

У міру розвитку методів і засобів технічної діагностики стратегія ТО і Р повинна перебудовуватися з планово-попереджувальної, в залежності від напрацювання, на адаптивну в залежності від стану елементів машин [8].

Безперервне збільшення обсягів робіт ТМ в регіонах України призводить до зростання заявочної потреби в машинах в їх транспортних системах. Основна причина такого зростання полягає в тому, що наявний парк за своїми характеристиками не відповідає необхідній потужності машин, тобто до насичення машинних парків технікою малої одиничної потужності, з недостатньою мобільністю і поганою відповідністю до складних умов експлуатації. Такі машини в залежності від виробничих підприємств мають численні аварійні відмови, що вимагає наявності потужної ремонтної бази [9, 10].

Зміна власника техніки в роки економічних реформ призвела до прискореного старіння парків ТМ за рахунок малого відсотка їх поновлення [9]. За роки реформ також відбулося падіння обсягів виробництва ТМ. За останні роки питома вага машин зарубіжного виробництва в загальному парку ТМ збільшилася в середньому з 26 до 40%. Тенденція старіння основних видів ТМ пояснюється наявністю великої кількості

дрібних АТП в регіональних транспортних системах, а також про нерозвиненість лізингових форм їх використання [11-14].

Рівень фізичного зносу парків таких машин в даний час складає в середньому 35...50%. Це призводить до зниження їх виробничого завантаження та до зменшення обсягів робіт. В той же час загальна кількість машин в існуючих парках АТП досить велика, тобто відбувається умовне перенасичення парків машинами, а використовується найменш зношена і працездатна їх частина, а також є резерв техніки з високим рівнем зносу. Висока зношеність парків ТМ в даний час являє собою небезпеку не тільки зниження ефективності їх використання, постійного зростання приведених витрат на механізацію робіт, але і зниження надалі виробничого потенціалу в цілому і продуктивних можливостей в економіці регіонів і України в цілому [15].

Роботи по оновленню парків ТМ в даний час необхідно починати з розрахунків обсягів поставок нових і списання застарілих машин для вдосконалення структури машинних парків АТП і поліпшення їх типорозмірного складу та встановлення відповідності структури машинних парків виробничій програмі обсягу робіт. Це свідчить проте, що необхідно довести збільшення обсягу виробництва ТМ по найважливішій номенклатурі до значень, які забезпечували б економічну ефективність та безпеку країни та її регіонів [16].

В останні роки намітився явний перехід від екстенсивного розвитку машинних парків до інтенсивного: з'явилися нові ринкові структури і конкурентна ситуація в сфері використання ТМ; почався випуск сучасної потужної техніки універсального застосування; вдосконалюється кооперація із зарубіжними фірмами в області створення і використання нової техніки [17, 18]. Однак фахівці стверджують, що для зниження залишкової вартості основних фондів по ТМ і заміні їх на нові, багатьом регіонам буде потрібно не менше 18-20 років через вкрай обмежені фінансові можливості по оновленню парку машин.

Статистичні характеристики даних ТМ за віком та напрацювання протягом терміну їх служби свідчать про зниження їх напрацювання. Це обумовлює збільшення часу перебування ТМ в ТО і Р. При цьому дуже важливо для попередження раптових відмов ТМ мати уявлення про фактичний технічний їх стан. Зі збільшенням віку ТМ підвищується кількість не тільки раптових відмов, але й поточних та капітальних ремонтів: збільшення віку машин після десяти років експлуатації призводить до зниження їх напрацювання приблизно на 5%...8% щорічно. Все це вимагає додаткових витрат праці та коштів на підтримку машин в працездатному стані. Оскільки машинні парки АТП комплектувалися, в основному, ще в умовах централізованих поставок нової техніки, стабільного завантаження і масових обсягів робіт, а існування централізованої системи поновлення машинних парків пішло в минуле, то втрапився централізований зв'язок між споживачами і виробниками машин. В даний час оновлення парків машин частіше йде спонтанно, при цьому купується в більшості техніка імпортного виробництва [18, 19].

У той же час в нових ринкових умовах господарювання проблема організації та ефективного використання ТМ стає все більш актуальною. Особливістю сучасного етапу використання і розвитку ТМ є великомасштабне будівництво транспортних мереж в регіонах України, які вимагають використання різних видів ТМ [20].

Рішення даної проблеми потребує розробки концепції побудови системи ТМ для своєчасного і повного виконання намічених програм транспортних завдань в регіоні і в Україні в цілому. В даний час така система машин практично відсутня. Технічне переозброєння транспортної галузі обумовлює необхідність розробки теоретико-методологічних і практичних основ такої системи [21].

На економічні показники роботи системи машин в цілому і парків ТМ будуть впливати багато різноманітних взаємозалежних і часто суперечливих один одному факторів. До числа таких факторів слід віднести: якісний склад парків машин, організаційно-технічне забезпечення ремонтного виробництва, функціонально-організаційну схему управління ремонтним виробництвом, використання інформаційних потоків та інформаційних технологій в організації та управлінні ТО і Р ТМ та ін. [3, 5].

Звідси випливає, що основними принципами формування системи машин для окремого регіону або АТП і виконання програми робіт, що вимагають ефективного використання парку ТМ, є [1, 5, 10, 13]:

- мінімум сумарних витрат на компенсацію простоїв ТМ і об'єктів їх застосування;
- вдосконалення системи ремонтно-обслуговуючих та контролюючо-діагностичних технічних впливів для підтримання ТМ у постійній готовності до експлуатації;
- управління технічним станом існуючих парків ТМ на основі постійного моніторингу з використанням кількісної оцінки і перетворення інформаційних потоків, що характеризують динаміку структурних параметрів парків ТМ;
- підвищення конкурентноздатності парків машин на основі розширення лізингу техніки з метою технічного переоснащення та сервісного обслуговування ТМ.

Постановка завдання. Метою даної роботи є створення теоретико-методичних засад лізингу ТМ, як одного із способів переоснащення системи машин в регіонах України, з метою поліпшення організації виробництва з ТО і Р, управління технічним станом парків ТМ на АТП та підвищення ефективності використання парку рухомого складу на основі лізингових відносин.

Виклад основного матеріалу. Структурна схема формування системи машин регіону АТП, необхідні для виконання програми робіт із застосуванням транспортних систем регіону, показана на рис. 1.

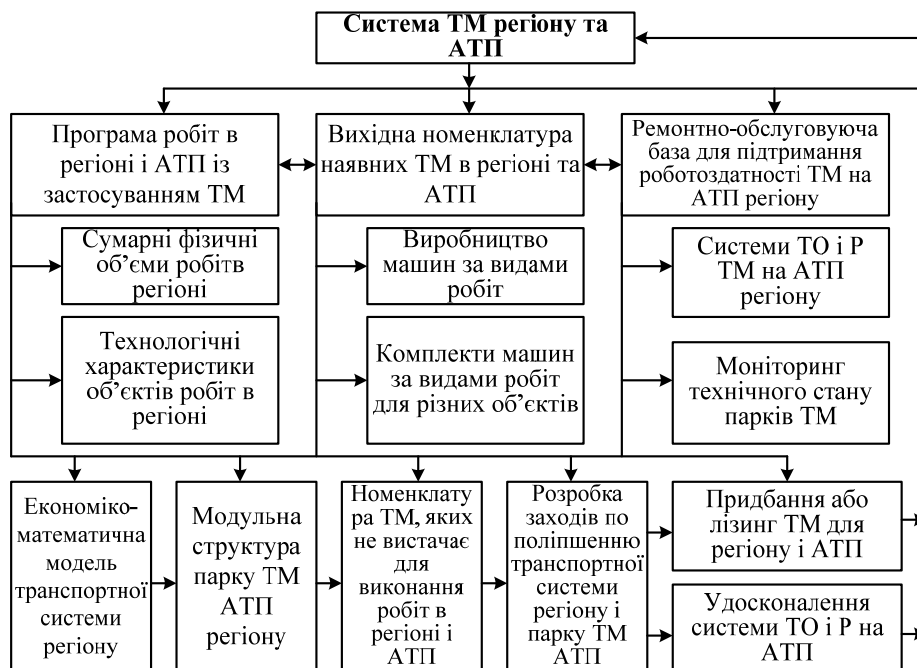


Рисунок 1 – Структурна схема системи ТМ регіону та автотранспортного підприємства
Джерело: розроблено авторами

Виходячи із структурної схеми системи ТМ, можна бачити, що одним з найважливіших її структурного формування є термін виконання загального обсягу робіт, передбачених програмою регіону або АТП. В якості критерію ефективності розробленої системи машин може бути прийнятий критерій мінімуму сумарних витрат на компенсацію простоїв як парків машин (окремих машин), так і ефективного їх застосування [1,22,23]. Цільовою функцією в даному випадку є функція мінімізації витрат, пов'язаних з простоями машин і їх ефективності застосування:

$$V = \sum_{i=1}^n Tnp_{ni} \cdot Cч_{nj} + \sum_{j=1}^m Tnp_{oj} \cdot Coj \rightarrow \min, \quad (1)$$

де Tnp_{ni} – кількість годин простоювання i -тої ТМ, год./рік;

$Cч_{nj}$ – умовна вартість однієї години простоювання ТМ, у.о./год;

Tnp_{oj} – кількість годин невикористання ТМ j -тим об'єктом год./рік;

Coj – умовна вартість простоювання фронту робіт на об'єкті застосування ТМ, у.о./год.;

$$Tnp_{nj} = \sum_{k=1}^K Tnp_{mk}, \quad (2)$$

де Tnp_{mk} – зниження часу простоювання k – того модуля парку машин або окремої машини, год./рік.

Аналіз складових цільової функції (1) показує, що в більшій мірі можна впливати на складову зниження витрат за рахунок часу простоювання ТМ.

Система машин може бути реалізована через формування парків ТМ на АТП, з урахуванням номенклатури машин якої бракує за видами робіт, з виробленням заходів з технічного переоснащення існуючих парків машин АТП. Для вирішення цієї проблеми необхідна взаємна ув'язка технологічних комплексів ТМ і обсягів планованих для них робіт [24,25].

Система машин повинна складатися з окремих парків ТМ на АТП регіону, що мають модульну структуру, обумовлену рядом ознак. До числа таких ознак можна віднести: наявність ТМ різного призначення; різної продуктивності; різного віку і напрацювання за термін експлуатації; країна-виробник та ін.

Схема модульної структури парків ТМ на АТП, що входять в систему машин регіону, представлена на рис. 2.

Така структура машинних парків АТП регіону необхідна для найбільш оптимального використання машин по їх продуктивності і збільшення тривалості робочого часу і повинна розглядатися з позиції сумарного ефекту від виробничої та технічної експлуатації парків машин АТП. Ця умова може бути виконана тільки при тісному взаємозв'язку виробничої та технічної експлуатації ТМ, як підсистем, що взаємно впливають одна на одну. Підвищення ефективності використання ТМ в процесі виробничої експлуатації може бути отримано за рахунок збільшення напрацювання між виконуваними технічними впливами з технічного обслуговування на основі діагностичної інформації [26].

У нових ринкових умовах господарювання необхідно поставити у відповідність систему машинних парків АТП регіону, що мають модульну структуру, функції якої дозволяють підвищити їх конкурентоспроможність. Така система може ґрунтуватися не тільки на більш раціональній системі ТО і Р, але і на розвиненій мережі регіональних лізингових компаній, які організують технічне переозброєння і сервісне обслуговування ТМ на АТП [2, 5, 6, 9, 10].

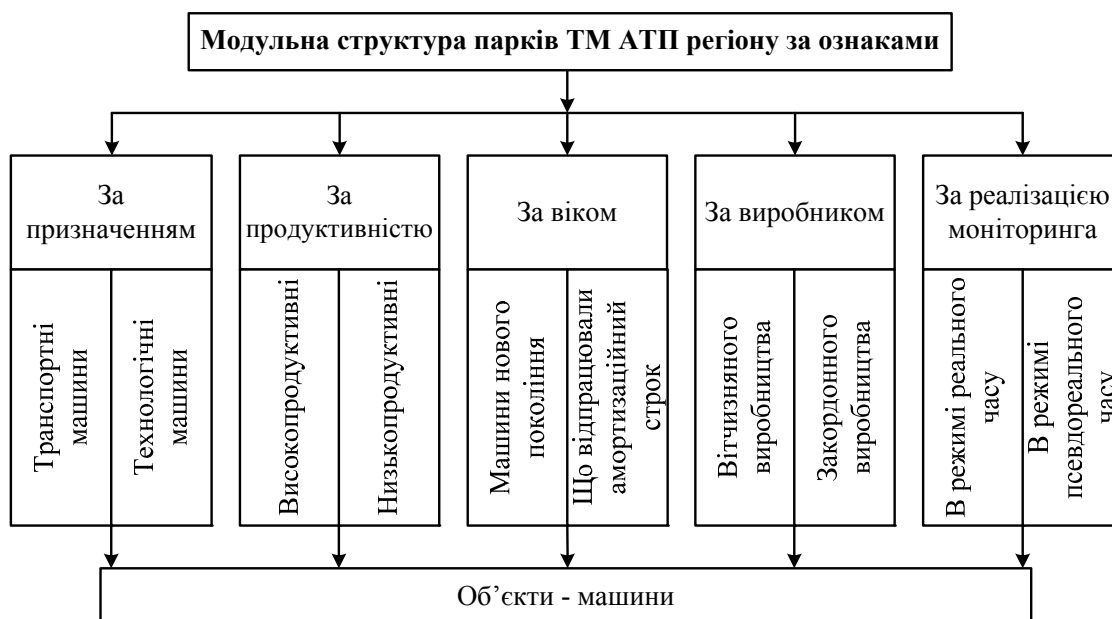


Рисунок 2 – Модульна структура парків транспортних машин автотранспортних підприємств регіону

Джерело: розроблено авторами

Лізингові компанії є сполучною ланкою між підприємствами, що мають в своєму розпорядженні парки ТМ, банками, машинобудівними і ремонтно-механічними підприємствами. Як і інші підприємницькі структури, лізингові компанії діють в умовах конкуренції на ринку ТМ, і їх інтереси можуть об'єднатися при вирішенні перспективних питань таких як джерела фінансування, розміщення власних баз АТП регіону і їх виробничих програм на перспективу. В оновленні машинних парків АТП раціональна кооперація навколо лізингових компаній дозволяє знайти найбільш ефективні рішення, отримати ефект і державну підтримку [27-30].

Основними завданнями при розробці питань нових лізингових відносин є наступні:

1. Розробка наукових теоретико-методичних засад формування сервісного обслуговування ТМ на АТП регіону.
2. Оптимізація видів послуг і технологій їх виконання на підприємствах регіону.
3. Оптимізація розміщення мережі технічних центрів і ремонтних підприємств в регіоні.
4. Розробка нормативних і технологічних документів, що забезпечують високу якість технічного обслуговування і поточного ремонту ТМ на АТП регіону.
5. Розробка комплексу технологічного обладнання і оснастки для технічного обслуговування і технічного ремонту ТМ на АТП.
6. Розробка системи збору та аналізу інформації по надійності і умов експлуатації (обслуговування і умов роботи) на АТП і транспортній системі регіону.

При формуванні парків ТМ для вирішення транспортних завдань і їх виконанні постійно збільшуються обсяги робіт й застосування ТМ в нових економічних умовах, особливо коли здійснюється це на основі різних форм лізингу [31]. Лізинг нових сучасних машин, в тому числі іноземного виробництва, вимагає індивідуального підходу до управління їх технічним станом. Оперативним лізингом передбачається передачу в оренду майна багаторазового використання на термін за часом коротшим за його амортизаційний термін служби. Лізинг цього виду характеризується невеликою

тривалістю контракту (до 3-5 років) і неповною амортизацією машин за час оренди. У разі фінансового лізингу після закінчення терміну дії лізингового договору орендар може повернути об'єкт оренди, продовжити угоду або укласти нову, а також купити об'єкт лізингу по залишковій вартості. Як правило, це можуть бути ТМ морально застарілі, мають низьку ефективність використання і не забезпечені запасними частинами. Організаційно-технічне забезпечення працездатності парків ТМ на АТП може бути досягнуто за рахунок використання того чи іншого виду лізингових операцій.

Ефективність лізингу ремонтованих машин залежить від рівнів їх охоплення технічним обслуговуванням і поточними ремонтами. Вибір об'єктів лізингу, його ефективність з точки зору підвищення коефіцієнта готовності ТМ (для лізингодавця) і одержуваного прибутку (для орендаря), а також з точки зору вибору оптимальної стратегії при виборі об'єкта укладення договору лізингу. В якості об'єктів лізингу розглядали транспортні машини, що вимагають виконання ТО і Р або орендарем, або лізингодавцем. При обмежених фінансових можливостях підприємств і в цілях економії може виникнути питання, щодо кількості машин, які слід взяти в лізинг.

Розглянемо теоретико-методичні засади лізингових відносин при визначенні можливого числа об'єктів лізингу та побудови алгоритму його знаходження.

Всі види системи технічних впливів представимо в табл.1 у матричній формі $\{N_{ij}\}$, де $i=1,2$: 1 – ТО і Р виконується орендарем, 2 – орендодавцем (лізингодавцем); $j = 1,2,3$: 1 – поточний ремонт; 2 - ТО-2; 3 - ТО-1.

Таблиця 1 – Види технічних впливів на елементи ТМ та модулі парку машин АТП

Показники	Загальна кількість ремонтів	Поточний ремонт	Технічне обслуговування	
			ТО-2	ТО-1
Заплановані технічні впливи	N_P	N_{PP} $k_{PP} = N_{PP} / N_P$	N_{TO-2} $k_{TO-2} =$ $N_{TO-2} / (N_P - N_{PP})$	N_{TO-1} $k_{TO-1} =$ $N_{TO-1} / (N_P - N_{PP})$
Впливи, що виконуються орендарем	N_{PX}	N_{11} $y_{PP} = N_{11} / N_{PX}$	N_{12} $y_{TO-2} =$ $N_{12} / (N_{PX} - N_{11})$	N_{13} $y_{TO-1} =$ $N_{13} / (N_{PX} - N_{11})$
Впливи, що виконуються лізингодавцем	N_{PL}	N_{21}	N_{22}	N_{23}

Джерело: розроблено авторами

За значеннями елементів матриці $\{N_{ij}\}$ можна визначити розрахункові коефіцієнти рівня охоплення ТО і Р, що характеризують розрахункову трудомісткість ТО і Р, взятих в оренду машин:

$$k_{PP} = N_{PP} / N_P, \quad k_{TO_i} = N_{TO_i} / (N_P - N_{PP}). \quad (3)$$

За результатами фактично виконуваних технічних впливів орендарем або лізингодавцем можна отримати фактичні коефіцієнти охоплення ТМ ТО і Р, виконаних орендарем:

$$y_{PP} = N_{11} / N_{PX}, \quad y_{TO_i} = N_{TO_i} / (N_{PX} - N_{11(12)}), \quad (4)$$

де N_{PP} – необхідна кількість поточних ремонтів ТМ певного виду протягом періоду лізингу.

Безпосередньо з матриці $\{N_{ij}\}$ впливає:

$$N_P = N_{PP} + (N_{TO-1} + N_{TO-2}) = N_{PX} + N_{OL}, \quad (5)$$

Звідси, якщо орендар для ТМ певних марок має свою ремонтну базу і здатний виконувати за умовами договору поточні ремонти, а для ТМ інших марок такої можливості немає. Виходячи з цього загальне число об'єктів лізингу визначається за формулою:

$$N_{OL} = N_{21} + N_{22} + N_{23}. \quad (6)$$

Можна бачити, що число об'єктів лізингу N_{OL} залежить крім фінансових можливостей орендаря ще й від того, на яких умовах між орендарем та лізингодавцем здійснюється ТО і Р машин.

Розглянемо теоретико-методичні засади технічної та економічної ефективності лізингу як засобу підвищення ефективності використання ТМ.

Ефективність лізингу можна виміряти такими показниками, як підвищення коефіцієнта готовності K_T парку машин або зниженням періоду окупності парку машин T_{OK} (для лізингодавця), розміром додатково одержуваного прибутку $P_{ліз}$ (для орендаря) та ін. Розглянемо варіант оцінки економічної ефективності лізингу за величиною прибутку $P_{ліз}$, як різниці доходів $D_{ліз}$ і витрат $V_{ліз}$ орендаря, відповідно до договору:

$$P_{ліз} = D_{ліз} - V_{ліз}. \quad (7)$$

Визначимо дохідну частину лізингу. Нехай T_{TM} – напрацювання транспортної машини, взятої в лізинг, год.; P_{num} – продуктивність машини в грошовому вираженні, грн/год. Тоді обсяг робіт P_{TM} , грн./маш., виконаний машиною, взятою в лізинг при певному напрацюванні складе:

$$P_{TM} = T_{TM} P_{num}, \quad (8)$$

З огляду на це дохід на лізинг становить:

$$D_{ліз} = P_{TM} N_{ол}. \quad (9)$$

Видаткова частина лізингу $V_{ліз}$ складається з двох частин – суми витрат $V_{\Sigma P}$, що йде безпосередньо на ТО і Р переданої в лізинг ТМ та з додаткових витрат $V_{дод.ліз}$. (націнки, транспортних витрат, орендної плати, страхування, вартості сервісних послуг і т.д.):

$$V_{ліз} = V_{\Sigma P} + V_{дод.ліз}. \quad (10)$$

З урахуванням даних табл. 1 витрати $V_{\Sigma P}$ дорівнюють:

$$V_{\Sigma P} = C_{PP,l} N_{21} + C_{TO-2,l} N_{22} + C_{TO-1,l} N_{23}, \quad (11)$$

де $C_{PP,l}, C_{TO-2,l}, C_{TO-1,l}$ – відповідні вартості поточного ремонту, технічного обслуговування ТО-2 та ТО-1;

N_{21}, N_{22}, N_{23} – кількість виконуваних орендаром поточних ремонтів, ТО-2 та ТО-1 відповідно.

Додаткові витрати $V_{дод.ліз}$ можна представити у вигляді, аналогічному (11):

$$V_{дод.ліз} = C_{PP,дод} N_{21} + C_{TO-2,дод} N_{22} + C_{TO-1,дод} N_{23}, \quad (12)$$

Тоді рівняння (10) можна записати у вигляді:

$$V_{ліз} = V_{\Sigma P} + V_{дод.ліз} = C_{PP,l} N_{21} + C_{TO-2,l} N_{22} + C_{TO-1,l} N_{23} + C_{PP,дод} N_{21} + C_{TO-2,дод} N_{22} + C_{TO-1,дод} N_{23}. \quad (13)$$

Враховуючи це, рівняння (7) можна записати у вигляді:

$$P_{ліз} = D_{ліз} - V_{ліз} = P_{TM} N_{ол} - \left(C_{PP,l} N_{21} + C_{TO-2,l} N_{22} + C_{TO-1,l} N_{23} + C_{PP,дод} N_{21} + C_{TO-2,дод} N_{22} + C_{TO-1,дод} N_{23} \right). \quad (14)$$

Останній вираз дає можливість оцінити частку прибутку АТП, що вноситься за рахунок використання ТМ за договором лізингу.

У нових економічних умовах з'являється альтернатива для АТП – взяття техніки в лізинг або купівля нової техніки. Для вибору більш вигідною стратегії в пропонується наступний алгоритм. Отримуваний при цих випадках прибуток $P_{ліз}$ і $P_{нов}$ може бути визначений по залежностям:

$$P_{ліз} = P_{ТМ} N_{ОЛ} - (V_{\Sigma P} + V_{дод.ліз}), \quad (15)$$

$$P_{нов} = \kappa_E P_{ТМ} N_{нов} - (V_{\Sigma нов} + V_{дод.нов}), \quad (16)$$

де $P_{ТМ}$ – дохідна частина лізингу, яка визначається за формулою (8).

$V_{\Sigma P}$ – сума витрат, що йде безпосередньо на ТО і Р переданих в лізинг ТМ;

$V_{дод.ліз}$ – додаткові витрати, пов'язані з лізингом;

κ_E – 1,2...1,4 – поправочний коефіцієнт, що враховує підвищення продуктивності праці за рахунок використання нових ТМ;

$V_{\Sigma нов}$ – витрати на придбання нових ТМ;

$V_{дод.нов}$ – додаткові витрати, пов'язані з експлуатацією нових ТМ.

Приймається, що витрати, пов'язані із закупівлею нових ТМ, дорівнюють обсягу фінансування лізингу:

$$V_{\Sigma} = V_{\Sigma нов} + V_{дод.нов}. \quad (17)$$

Кількість одиниць ТМ, що закуповується, можна визначити за формулою

$$N_{нов} = V_{\Sigma нов} / C_{нов}. \quad (18)$$

Різниця в прибутку ΔP приймається рівною різниці одержуваних доходів:

$$\begin{aligned} \Delta P &= D_{ліз} - D_{нов} = P_{ТМ} N_{ОЛ} - \kappa_E P_{ТМ} N_{нов} = (N_{ОЛ} - \kappa_E N_{нов}) P_{мех} = \\ &= \left(N_{ОЛ} - \kappa_E \cdot \frac{V_{\Sigma P} + V_{дод.ліз} - V_{дод.нов}}{C_{нов}} \right) = \\ &= N_{ОЛ} \left\{ 1 - \kappa_E \left[\alpha \cdot \frac{V_{PPЛ}}{C_{нов}} + (1 - \alpha) \cdot \frac{V_{PPЛ}}{C_{нов}} + \frac{V_{дод.ліз} - V_{дод.нов}}{C_{нов}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (19)$$

де $\alpha = N_{PPЛ} / N_{ОЛ}$ – частка машин, переданих в лізинг, з проведенням найбільш дорогого поточного ремонту.

Вираз (19) дозволяє оцінити знак різниці в прибутку ΔP , залежно від зміни вхідних в неї параметрів. Розрахунки показують, що при великих значеннях $C_{нов}$ (дуже дорогі ТМ) краще взяти машини в лізинг ($\Delta P > 0$); при великих значеннях коефіцієнта продуктивності праці κ_E і малих витратах $V_{дод.нов}$ – (менш дорогі ТМ) – доцільніше придбання нових машин ($\Delta P < 0$). Таким чином, ТО і Р ТМ стає важливим фактором формування парків машин АТП за рахунок їх лізингу.

Економічний ефект від впровадження пропонованої системи ТО і Р на АТП, за розрахунковий період роботи машин, формується за рахунок зменшення витрат на технічну експлуатацію машин з урахуванням знижуючого ефект фактора – витрат на проведення технічної діагностики

$$E_{TE} = \sum E_{ек} - \sum V_{\delta}, \quad (20)$$

де $\sum E_{ек}$ – економія за рахунок зниження витрат на експлуатацію ТМ при впровадженні запропонованої системи ТО і Р, грн/період експлуатації;

$\sum V_{\delta}$ – витрати на діагностику ТМ, грн/період діагностики.

Економічний ефект визначається на основі значень собівартості 1 мото-год ТМ, розрахунок якої виконаний за даними бухгалтерії АТП. Економія підприємства за рахунок зниження витрат на експлуатацію машин при впровадженні об'єктно-орієнтованої системи ТО і Р $E_{ек}$ може бути визначена наступним чином:

$$E_{ек} = \Delta V_{ТОіР} + \Delta V_{зч} + \Delta V_{доод}, \quad (21)$$

де $\Delta V_{ТОіР}$ – зменшення витрат на проведення ТО і Р при збільшенні періодичності ремонтно-обслуговуючих впливів, грн.;

$\Delta V_{зч}$ – зменшення витрат на запасні частини при проведенні ТО і Р, грн.;

$\Delta V_{доод}$ – економія за рахунок виконання додаткового обсягу робіт за рахунок скорочення часу виконання ТО і Р, грн.

Економія коштів за рахунок ТО і Р машин може бути визначена по залежності:

$$\Delta V_{ТОіР} = \sum_{i=1}^n C_{зод} \cdot n \cdot \Delta t \cdot N_i, \quad (22)$$

де $C_{зод}$ – годинна заробітна плата з нарахуваннями ремонтників, грн/год;

n – число ремонтного персоналу для виконання робіт по ТО і Р;

Δt – скорочення трудомісткості ТО і Р за рахунок впровадження об'єктно-орієнтованої системи ТО і Р на АТП;

N_i – кількість машин в парку АТП.

Економія за рахунок зниження витрат на запасні частини може бути визначена за формулою:

$$\Delta V_{зч} = C_p \cdot \Delta t \cdot N_i, \quad (23)$$

де C_p – собівартість 1 години ремонту, грн/на період ремонту.

Вартість додаткового обсягу робіт, виконаного машинами при впровадженні об'єктно-орієнтованої системи ТО і Р дорівнює:

$$\Delta V_{доод} = C_{мото-зод} \cdot \Delta t \cdot N_i, \quad (24)$$

де $C_{мото-зод}$ – собівартість 1 години експлуатації машин, грн./розр. період;

Витрати на діагностику машин можна визначити по залежності:

$$V_{\delta} = C_{\delta} \cdot H_a^{\delta} + C_{пл} \cdot n + C_{ен} + C_{пл}^{зн} \cdot n, \quad (25)$$

де C_{δ} – вартість діагностичного обладнання, грн.;

H_a^{δ} – норма амортизації діагностичного обладнання, приймаємо 10% рік;

$C_{пл}$ – заробітна плата оператора діагностичного обладнання, грн./рік;

n – число років у розрахунковому періоді;

$C_{ен}$ – витрати на енергоресурси при виконанні технічної діагностики протягом розрахункового періоду, грн./розр. період;

$C_{пл}^{зн}$ – заробітна плата інженера, що здійснює інформаційний моніторинг технічного стану машин, грн./рік.

Витрати на енергоресурси при виконанні технічної діагностики можуть бути визначені за формулою:

$$V_{ен}^{\delta} = C_{\delta} \cdot m_{\delta} \cdot N_i, \quad (26)$$

де C_{δ} – енергетичні витрати на одне діагностування.

Якщо прийняти, що час діагностування однієї машини складе приблизно 0,5 год, тоді енергетичні витрати можна розрахувати як 0,5 від вартості енергетичних витрат машини, що включають вартості дизельного палива $C_{дн}$, бензину $C_{б}$, мастильних

матеріалів C_{mm} , а також питомі амортизаційні відрахування за час проведення діагностичних операцій $C_{ам}$:

$$C_{\delta} = 0,5 \cdot (C_{\delta n} + C_{\delta} + C_{mm} + C_{ам}); \quad (27)$$

m_{δ} – число діагностичних операцій для однієї машини протягом розрахункового періоду; для прийнятих значень періодичності ТО і Р і двох діагностичних перевірок між черговими ТО-1.

Остаточо економічний ефект від впровадження об'єктно-орієнтованої системи ТО і Р дорівнює:

$$E = E_{ек} - V_{\delta}. \quad (28)$$

Зазначене являє собою методику оцінки економічного ефекту, отриманого АТП від лізингових відношень, а також без них, при використанні ТМ, а послідовність розрахунків є алгоритмом визначення відповідних витрат.

Висновки:

1. Проблема ефективного використання та організації виробництва з технічного обслуговування і ремонту парків ТМ на сьогодні є вельми актуальною. Особливою складністю даної проблеми є певна зношеність машинних парків в силу їх комплектації в умовах централізованої системи поставок нової техніки і планового списання зношених машин.

2. Показано, що раціональна організація виробництва з ТО і Р парків транспортних машин є найважливішим інструментом конкурентної боротьби за ринки їх застосування та встановлення надійних партнерських відносин із замовниками.

3. З'ясовано, що роботу парків ТМ можна розглядати як керовану, динамічну виробничо-економічну систему з стохастичним характером зміни технічного стану, для управління яким існують дві основні стратегії: профілактична і аварійно-відновлювальна. Певні недоліки цих стратегій обумовлюють необхідність розробки раціональної, більш гнучкої системи ТО і Р парків машин, яка повинна мати переваги обох стратегій: проведення технічних впливів з оптимальною періодичністю, регламентоване виконання діагностичних перевірок технічного стану машин, управління якістю функціонування парку машин на основі моніторингу технічного стану ТМ.

4. Виявлено, що встановлення оптимальної періодичності проведення профілактичних ремонтно-обслуговуючих та контрольних-діагностичних впливів є завданням, що вимагає обліку багатьох технічних і економічних факторів і, в першу чергу, ймовірного характеру моментів часу виникнення відмов транспортних машин. Рішення даного завдання має бути спрямоване на підвищення ефективності використання парків ТМ для виконання транспортних програм регіонів і муніципальних АТП.

5. При обмежених фінансових можливостях і можливостей ремонтної бази АТП може виникнути питання, яку кількість машин взяти в лізинг для формування парку машин необхідного вікового і типорозмірного складу. Запропоновано методику та алгоритм визначення можливого числа об'єктів лізингу на основі складання матриці виконуваних технічних впливів і коефіцієнтів охоплення транспортних машин ТО і Р.

6. Запропоновано методику і алгоритм оцінки технічної та економічної ефективності лізингу за величиною прибутку $P_{ліз}$, як різниці доходів $D_{ліз}$ і витрат $V_{ліз}$, орендаря відповідно до договору і вибору найбільш вигідної стратегії поповнення парку машин за рахунок купівлі нових машин або лізингових відносин. Розрахунки показують, що при великих значеннях $C_{нов}$ (дорогі вітчизняні або імпортовані транспортні машини) краще взяти їх в лізинг і, навпаки, при малих витратах $C_{дод.нов}$ – доцільніше буде придбання нової техніки АТП.

Список літератури

1. Аулін В.В., Замота О.М. Економічне обґрунтування ефективності та рентабельності використання транспортних засобів на АТП. *Вісник інж. академії України*. 2014. №1. С. 160-164.
2. Аулін В.В., Лівіцький О.М., Замота О.М. Методологія вибору та управління ефективністю використання техніки у сільськогосподарському виробництві. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2016. Вип. 29. С.2-12.
3. Лівіцький О.М. Вдосконалення технічного сервісу автотракторної техніки в умовах агропромислового виробництва. *Вісник Центральноукраїнського національного технічного університету*. 2021. Вип. 4(35). С. 36 - 45.
4. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Голуб Д.В., Лівіцький О.М. Підвищення ефективності використання транспортних машин у агропромисловому виробництві узгодженням їх експлуатаційних характеристик та умов функціонування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37) ч.ІІ. С.45-57.
5. Аулін В.В., Лівіцький О.М., Замота О.М. Вплив надійності сільськогосподарської та транспортної техніки на оптимальний термін її служби. *Крамаровські читання: збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції, 21-22 лют. 2019 р., м. Київ. НУБіП*. 2019. С. 83-86.
6. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Чернай А.Є., Голуб Д.В., Головатий А.О. Теоретичне обґрунтування управління функціонуванням технічними та транспортними системами на основі методів системної теорії інформації. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4(35). С.178-189.
7. Аулін В.В. Використання методів теорії сенситивів при розв'язанні завдань технічних, транспортних і виробничих систем і процесів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36) ч.І. С.299-310.
8. Аулін В.В., Лівіцький О.М., Гриньків А.В., Кернус Р.О. Інтелектуальні елементи експертних систем в галузі транспорту і виробництва. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту: Збірник наукових матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет конференції, ЦНТУ м.Кропивницький, Україна, 18-19 листопада 2020р.* С.151-161.
9. Плекан У.М., Ляшук О.Л., Аулін В.В., Цьонь О.П., Матвійшин А.Й. Логістична стратегія автотранспортного підприємства. Організаційні аспекти формування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37) ч.ІІ. С.75-82.
10. Методологічні основи проектування та функціонування інтелектуальних транспортних і виробничих систем : монографія / В. В. Аулін, А. В. Гриньків, А. О. Головатий [та ін.] ; під заг. ред. В. В. Ауліна. - Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2020. - 428с.
11. Аулін В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Дьяченко В.О. Теоретичний системно-спрямований підхід до визначення інтегрального показника ефективності реалізації операцій в транспортних системах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2021. Вип. 4(35). С.232-247.
12. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем / Аулін В.В. та ін.; заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.
13. Куналова Г.І., Гринчук Ю.С. Лізинг в Україні: статистико-економічний аналіз, прогноз, шляхи подальшого розвитку. Біла Церква: ВАТ "Білоцерківська друкарня", 2007. 237 с.
14. Закон України "Про лізинг" від 11.12.2003 № 1381-IV.
15. Карінцева О.І., Харченко М.О., Кальченко С.О. Ефективність використання лізингу в сучасних умовах. *Механізм регулювання економіки*. 2016. № 3. С. 97-106.
16. Клименко І. В. Лізинг транспортних засобів: теоретичні складові та моніторинг сучасного стану. *Проблеми теорії та методології бухгалтерського обліку, контролю і аналізу*. 2013. Вип. 1. С. 103-125.
17. Лук'янова О.М. Шляхи удосконалення застосування лізингу рухомого складу на залізничному транспорті України: автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук: 08.00.03. Харків, 2011. 22 с.
18. Ковальчук К. Ф., Савчук К.М., Вишнякова Т.В. Методологія вибору ефективного виду лізингової угоди основними учасниками: монографія. Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2007. 117 с.
19. Dalfard V.M., Sohrabian A., Najafabadi A.M., & Alvani J. Performance Evaluation and Prioritization of Leasing Companies Using the Super Efficiency Data Envelopment Analysis Model. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2012. Vol. 9. No. 3. P. 183-194.

20. Розвиток транспорту з метою відновлення і зростання української економіки : наукова доповідь: за ред. д-ра екон. наук О.І. Никифорок; НАН України, ДУ "Ін-т екон. та прогнозув. НАН України". К., 2018. 200 с.
21. Механізми ефективного використання та розвитку потенціалу транспортно-дорожнього комплексу України. К.: НІСД, 2014. 60 с.
22. Корінев В.Л. Сутність та види лізингу для підприємства. *Держава та регіони. Економіка та підприємництво*. 2011. № 1. С. 108-112.
23. Настасьєв В.М. Організаційно-економічні механізми активізації лізингової діяльності підприємств: автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.06.01. Львів : Інститут регіональних досліджень НАН України, 2006. 20 с.
24. Grandell J. Simple approximations of ruin probabilities /Insurance: Mathematics and Economics, 2000. No. 26.-Vol. 157-173.
25. Чередниченко О.Ю. Фінансовий лізинг як одна з можливостей оновлення рухомого складу. *Вісник економіки транспорту та промисловості*. 2009. № 27. С.70-71.
26. Аулін В.В., Гриньків А.В. Методика вибору діагностичних параметрів технічного стану транспортних засобів на основі теорії сенситивів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. – 2016. №5. С. 109-116.
27. Подольчак Н.І., Загородній А.Г. Сутність та етапи реалізації лізингової діяльності підприємства. *Вісник Волинського Національного університету ім. Лесі Українки*. 2009. № 15. С. 50–54.
28. Клименко І. В. Лізинг у системі забезпечення надання транспортної послуги автотранспортним підприємством. *Економіка України*. 2014. № 7. С. 39-48.
29. Скоцик В. Є. Лізинг як джерело оновлення парку техніки сільськогосподарських підприємств. *Інноваційна економіка*. 2013. № 6. С. 258-261.
30. Пивовар П. В. Лізинг як джерело формування машинно-тракторних парків сільськогосподарських підприємств. *Економіка та держава*. 2012. № 11. С. 66-69.
31. Палієнко І.В., Кочетков І.В. Аналіз сучасних методик оцінки ефективності лізингових операцій [Електронний ресурс]. Режим доступу : <http://probl-economy.kpi.ua/pdf/2012-1.pdf>.
32. Клименко І. В. Лізинг в системі забезпечення надання послуг автотранспортним підприємством: облікові аспекти. *Торгівля, комерція, підприємництво*. 2013. Вип. 15. С. 164-168.
33. Клименко І. В. Лізинг транспортних засобів: теоретичні складові та моніторинг сучасного стану. *Проблеми теорії та методології бухгалтерського обліку, контролю і аналізу*. 2013. Вип. 1. С. 103-125.

References

1. Aulin, V.V. & Zamota, O.M. (2014). Ekonomichne obgruntuvannya efektyvnosti ta rentabelnosti vykorystannia transportnykh zasobiv na ATP [Economic substantiation of the efficiency and profitability of using vehicles on the ATP]. *Visnyk inzh. akademii Ukrainy – Herald Eng. Academy of Ukraine*, 1, 160-164 [in Ukrainian].
2. Aulin, V.V., Livitskiy, O.M. & Zamota, O.M. (2016). Metodolohiia vyboru ta upravlinnia efektyvnosti vykorystannia tekhniki u silskohospodarskomu vyrobnytstvi [Methodology of selection and management of the efficiency of the use of machinery in agricultural production]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia – Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, Issue 29*, 2-12 [in Ukrainian].
3. Livitskiy, O.M. (2021). Vdoskonalennia tekhnichnoho servisu avtotraktornoï tekhniki v umovakh ahropromyslovoho vyrobnytstva [Improvement of the technical service of auto-tractor equipment in the conditions of agro-industrial production]. *Visnyk Tsentralnoukrainskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Central Ukrainian National Technical University. Issue 4(35)*, 36-45 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V., Holub, D.V. & Livitskiy, O.M. (2022). Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia transportnykh mashyn u ahropromyslovomu vyrobnytstvi uzgodzhenniam yikh ekspluatatsiinykh kharakterystyk ta umov funktsionuvannya [Increasing the efficiency of the use of transport vehicles in agro-industrial production by harmonizing their operational characteristics and operating conditions]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 6(37), part. II*, 45-57 [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Livitskiy, O.M. & Zamota, O.M. (2021). Vplyv nadiinosti silskohospodarskoi ta transportnoi tekhniki na optymalnyi termin yii sluzhby [The influence of the reliability of agricultural and transport equipment on its optimal service life]. *Kramarov's readings: VI Mizhnarodna nauково-tekhnichna konferentsia (21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv) – VI International Scientific and Technical Conference* (pp. 83-

- 86), Kyiv: NUBiP [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V., Livitskiy, O.M., Chernai, A.Ie., Holub, D.V. & Holovaty, A.O. (2021). Teoretychne obgruntuvannya upravlinnia funktsionuvanniam tekhnichnymy ta transportnymy systemamy na osnovi metodiv systemnoi teorii informatsii [Theoretical substantiation of the management of the functioning of technical and transport systems based on the methods of system theory of information]. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 4(35)*, 178-189 [in Ukrainian].
 7. Aulin, V.V. (2022). Vykorystannya metodiv teorii sensytyviv pry rozv'iazanni zavdan tekhnichnykh, transportnykh i vyrobnychykh system i protsesiv [The use of methods of the theory of sensitivities in solving problems of technical, transport and production systems and processes]. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 5(36), part.I*, 299-310 [in Ukrainian].
 8. Aulin, V.V., Livitskiy, O.M., Hrynkiv, A.V. & Kernus, R.O. (2020). Intelektualni elementy ekspertnykh system v haluzi transportu i vyrobnytstva [Intelligent elements of expert systems in the field of transport and production]. *Innovatsiini tekhnologii rozvytku ta efektyvnosti funktsionuvannia avtomobilnoho transportu – Innovative technologies for the development and efficiency of the functioning of road transport: Mizhnarodna naukovo-praktychna internet konferentsia (18-19 lystopada 2020r., Kropyvnytskyi) – International Scientific and Practical Internet Conference (pp. 151-161), Kropyvnytskyi : CUNTU* [in Ukrainian].
 9. Plekan, U.M., Liashuk, O.L., Aulin, V.V., Tson, O.P. & Matviishyn, A.I. (2022). Lohistychna stratehiia avtotransportnoho pidpriemstva. Orhanizatsiini aspekty formuvannia [Logistics strategy of the motor transport company. Organizational aspects of formation.]. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 6(37), part.II*, 75-82 [in Ukrainian].
 10. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Holovaty, A.O. et al. (2020). *Metodolohichni osnovy proektuvannia ta funktsionuvannia intelektualnykh transportnykh i vyrobnychykh system: monohrafiia [Methodological bases of design and functioning of intelligent transport and production systems: monograph]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F. [in Ukrainian].
 11. Aulin, V.V., Holub, D.V., Zamurenko, A.S., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V. & Diachenko, V.O. (2021). Teoretychni systemno-spriamovani pidkhid do vyznachennia intehralnogo pokaznyka efektyvnosti realizatsii operatsii v transportnykh systemakh [A theoretical system-oriented approach to determining the integral indicator of the effectiveness of operations in transport systems]. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 4(35)*, 232-247 [in Ukrainian].
 12. Aulin, V.V. et al. (2021). *Teoretychni i metodolohichni osnovy lohistyky transportnykh i vyrobnychykh system [Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems]* Kropyvnytskyi: Vydavets Lysenko V.F. [in Ukrainian].
 13. Kunalova, H.I. & Hrynychuk, Yu.S. (2007). *Lizynh v Ukraini: statystyko-ekonomichniy analiz, prohoz, shliakhy podalshoho rozvytku [Leasing in Ukraine: statistical and economic analysis, forecast, ways of further development]*. Bila Tserkva: VAT "Bilotserkivska drukarnia" [in Ukrainian].
 14. Zakon Ukrainy "Pro lizynh" vid 11.12.2003 № 1381-IV [Law of Ukraine "On Leasing" dated 11.12.2003 No. 1381-IV] .(n.d.) [in Ukrainian].
 15. Karintseva, O.I., Kharchenko, M.O. & Kalchenko, S.O. (2016). Efektyvnist vykorystannya lizynhu v suchasnykh umovakh [Effectiveness of using leasing in modern conditions]. *Mekhanizm rehuliuвання ekonomiky – Mechanism of economic regulation, 3*, 97-106 [in Ukrainian].
 16. Klymenko, I.V. (2013). Lizynh transportnykh zasobiv: teoretychni skladovi ta monitorynh suchasnoho stanu [Leasing of vehicles: theoretical components and monitoring of the current state]. *Problemy teorii ta metodolohii bukhhalterskoho obliku, kontroliu i analizu – Problems of the theory and methodology of accounting, control and analysis, Issue 1*, 103-125 [in Ukrainian].
 17. Lukianova, O.M. (2011). Shliakhy udoskonalennia zastosuvannia lizynhu rukhomoho skladu na zaliznychnomu transporti Ukrainy [Ways of improving the use of rolling stock leasing in railway transport of Ukraine]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
 18. Kovalchuk, K. F., Savchuk, K.M. & Vyshniakova, T.V. (2007). *Metodolohiia vyboru efektyvnoho vydu lizynhovoї uhođy osnovnymy uchastnykamy: monohrafiia [Methodology of choosing an effective type of leasing agreement by the main participants: monograph]*. Dnipropetrovsk: IMA-pres [in Ukrainian].
 19. Dalfard, V.M., Sohrabian, A., Najafabadi, A.M., & Alvani, J. (2019). Performance Evaluation and Prioritization of Leasing Companies Using the Super Efficiency Data Envelopment Analysis Model. *Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 9, 3*, 183-194 [in English].
 20. Nykyforuk, O.I. (2018). *Rozvytok transportu z metoiu vidnovlennia i zrostannia ukrajnskoї ekonomiky*

- [Development of transport for the purpose of recovery and growth of the Ukrainian economy: scientific report]. O.I. Nykyforuk (eds.); NAN Ukrainy, DU "In-t ekon. ta prohnozuv. NAN Ukrainy". Kyivs [in Ukrainian].
21. *Mekhanizmy efektyvnoho vykorystannia ta rozvytku potentsialu transportno-dorozhnoho kompleksu Ukrainy [Mechanisms of effective use and development of the potential of the transport and road complex of Ukraine]*. (2014). Kyiv: NISD [in Ukrainian].
 22. Koriniev, V.L. (2011). Sutnist ta vydy lizynhu dlia pidprijemstva [The essence and types of leasing for an enterprise]. *Derzhava ta rehiony. Ekonomika ta pidprijemnytstvo – State and regions. Economy and entrepreneurship, 1*, 108-112 [in Ukrainian].
 23. Nastasiev, V.M. (2006). Orhanizatsiino-ekonomichni mekhanizmy aktyvizatsii lizynhovoї diialnosti pidprijemstv [Organizational and economic mechanisms of intensification of leasing activity of enterprises]: *Extended abstract of candidate's thesis*. Lviv [in Ukrainian].
 24. Grandell, J. (2000). Simple approximations of ruin probabilities. *Insurance: Mathematics and Economics, 26*, 157-173 [in English].
 25. Cherednychenko, O.Iu. (2009). Finansovyi lizynh yak odna z mozhlyvostei onovlennia rukhomoho skladu [Financial leasing as one of the possibilities of renewal of rolling stock]. *Visnyk ekonomiky transportu ta promyslovosti – Bulletin of the Economy of Transport and Industry, 27*, 70-71 [in Ukrainian].
 26. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V. (2016). Metodyka vyboru diahnostychnykh parametrov tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv na osnovi teorii sensytyviv [The method of selecting diagnostic parameters of the technical condition of vehicles based on the theory of sensitivities]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, 5*, 109-116 [in Ukrainian].
 27. Podolchak, N.I. & Zahorodni, A.H. (2009). Sutnist ta etapy realizatsii lizynhovoї diialnosti pidprijemstva [The essence and stages of the enterprise's leasing activity]. *Visnyk Volynskoho Natsionalnoho universytetu im. Lesi Ukrainky – Bulletin of the Volyn National University named after Lesya Ukrainka, 15*, 50-54 [in Ukrainian].
 28. Klymenko, I.V. (2014). Lizynh u systemi zabezpechennia nadannia transportnoi posluhy avtotransportnym pidprijemstvom [Leasing in the system of ensuring the provision of transport services by a motor vehicle enterprise]. *Ekonomika Ukrainy – Ukraine economy, 7*, 39-48 [in Ukrainian].
 29. Skotsyk, V.Ye. (2013). Lizynh yak dzherelo onovlennia parku tekhniki silskohospodarskykh pidprijemstv [Leasing as a source of renewal of the equipment park of agricultural enterprises]. *Innovatsiina ekonomika – Innovative economy, 6*, 258-261 [in Ukrainian].
 30. Pyvovar, P.V. (2012). Lizynh yak dzherelo formuvannia mashynno-traktornykh parkiv silskohospodarskykh pidprijemstv [Leasing as a source of formation of machine and tractor fleets of agricultural enterprises]. *Ekonomika ta derzhava – Economy and the state, 11*, 66-69 [in Ukrainian].
 31. Paliienko, I.V. & Kochetkov, I.V. (2012). Analiz suchasnykh metodyk otsinky efektyvnosti lizynhovykh operatsii [Analysis of modern methods of evaluating the effectiveness of leasing operations] . Retrieved from <http://probl-economy.kpi.ua/pdf/2012-1.pdf> [in Ukrainian].
 32. Klymenko, I.V. (2013). Lizynh v systemi zabezpechennia nadannia posluh avtotransportnym pidprijemstvom: oblikovi aspekty [Leasing in the system of ensuring the provision of services by a motor transport company: accounting aspects]. *Torhivlia, komertsii, pidprijemnytstvo – Trade, commerce, entrepreneurship, 15*, 164-168 [in Ukrainian].
 33. Klymenko, I.V. (2013). Lizynh transportnykh zasobiv: teoretychni skladovi ta monitorynh suchasnoho stanu [Leasing of vehicles: theoretical components and monitoring of the current state]. *Problemy teorii ta metodolohii bukhhalterskoho obliku, kontroliu i analizu – Problems of the theory and methodology of accounting, control and analysis, 1*, 103-125 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Oleg Liashuk, Prof., DSc.

Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

Andrey Hrinkiv, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Serhii Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Viktor Hud, Prof., DSc., **Volodymyr Teslia**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine

Theoretical and Methodological Principles of Increasing the Efficiency of the Use of a Fleet of Cars in Regional Transport Systems and Enterprises Based on Leasing Relations

This work examines the problem of technical and economic efficiency of purchasing new transport vehicles by motor vehicle enterprises of the region by purchase and with the help of leasing relations in order to

increase their productivity and efficiency. It is shown that there is a need to create the theoretical and methodological foundations of the leasing of transport vehicles, as one of the ways to re-equip the system of vehicles in the regions of Ukraine and increase the efficiency of their use on the basis of leasing relations. It is substantiated that when developing the foundations, it is expedient to base the system on improving the technical condition of machines with the appropriate strategy of their maintenance and repair. A structural diagram of the system of transport vehicles of the region and motor transport enterprises, which have a modular structure of rolling stock, was built.

The main tasks in the development of issues of new leasing relations are outlined. When determining the number of leasing objects, the matrix of the system of technical effects of operations was used, according to the strategy of maintenance and repair of transport vehicles. When creating the theoretical and methodological foundations of the technical and economic efficiency of leasing, the costs for the implementation of maintenance and repair operations of transport vehicles were considered. It is noted that when leasing, it is important to assess the technical condition of transport vehicles by diagnosing them.

The work defines the conditions under which it is expedient to develop leasing relations and when motor vehicle enterprises simply buy new vehicles. The sequence of the assessment of the corresponding costs is shown.

transport vehicle, theoretical and methodological principles, leasing, maintenance and repair, transport system, motor vehicle enterprise, technical condition, efficiency of use

Одержано (Received) 16.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 629.332

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.180-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.180-189)

Ів.Б. Гевко, проф., д-р техн. наук, **Ю.І. Пиндус**, канд. техн. наук, **М.Г. Левкович**, доц., канд. техн. наук, **В.О. Тесля**, канд. техн. наук, **А.Б. Гупка**, канд. техн. наук, **М.Д. Сіправська**, асист.

*Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна
e-mail: volodymyr_teslya@ukr.net*

Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричіпа вантажного автомобіля в залежності від розміщення перемичок

За допомогою методу напруження-деформації було проведено комплексне дослідження кузовів вантажних напівпричепів, що призвело до розробки інноваційних інженерних рішень, спрямованих на підвищення їх техніко-економічних показників. Це було досягнуто шляхом аналізу впливу різних факторів на особливості будови та конструкції. Результати дослідження були отримані на основі напружено-деформованого стану (НДС) з використанням передових методів інженерного аналізу, зокрема із застосуванням спеціалізованого програмного комплексу SolidWorks на САД-моделі, що представляє кузов напівпричіпа вантажівки.

вантажний автомобіль, напівпричіп, конструкція, напружено-деформований стан, геометричні параметри

Постановка проблеми. Транспортна галузь відіграє важливу роль в економіці України, причому ефективне переміщення товарів має вирішальне значення для різних секторів. Серед ключових компонентів транспортної галузі є причепа вантажних автомобілів, які є необхідним обладнанням для транспортування вантажів по країні.

© Ів.Б. Гевко, Ю.І. Пиндус, М.Г. Левкович, В.О. Тесля, А.Б. Гупка, М.Д. Сіправська, 2023

Транспортна галузь України покладається на різноманітний асортимент причепів для задоволення різноманітних транспортних потреб. Кожен тип задовольняє певні вимоги до вантажу та надає спеціальні функції для забезпечення безпечного та ефективного транспортування.

Причепи відіграють вирішальну роль у транспортній галузі України завдяки своїм численним перевагам. Вони пропонують підвищену вантажопідйомність порівняно з іншими видами транспорту, що дозволяє перевозити значні обсяги вантажу за одну поїздку. Така ефективність допомагає оптимізувати логістичні операції, зменшити витрати на транспортування та підвищити загальну продуктивність.

Функціонування причепів у транспортній галузі України не позбавлене проблем. Обмеження інфраструктури, включаючи стан доріг і затори, можуть вплинути на ефективність роботи причепів. Крім того, дотримання транспортних правил, забезпечення безпеки вантажу, підтримання технічного обслуговування та придатності причепів до експлуатації є постійними проблемами.

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження впливу геометричних параметрів елементів днища кузова напівпричіпа вантажного автомобіля на його напружено-деформований стан.

Щоб вирішити цю проблему, використовується комбінація аналітичних, чисельних та експериментальних методів для дослідження напружено-деформованого стану конструкції в кузовах автомобілів.

Виклад основного матеріалу. Під час проектування кузовів вантажівок мінімізація ваги має вирішальне значення через її вплив на витрати виробництва, вантажопідйомність і економію палива. Відповідно до концепції зменшення ваги при збереженні необхідної міцності моделюється та аналізується модель кузова зі змінними параметрами елементів днища. CAD-моделі кузовів та напружено-деформаційний аналіз швелерів днища напівпричепів виконано за допомогою SolidWorks.

Як правило, нижня частина днища і бортів кузовів вантажних автомобілів виготовляються з використанням швелерних елементів (рис. 1).

Отже, виникає необхідність оптимізації конструкції кузова напівпричіпа вантажного автомобіля з метою підвищення вантажопідйомності, міцності, зниження ваги та продовження терміну експлуатації. Тому надзвичайно актуальним стає проведення оптимізації будови кузова шляхом вивчення різноманітних моделей.

При проектуванні борта кузова необхідно зосередити увагу на розміри швелера, матеріал їх розміщення та кількість, адже дані фактори відіграють значну роль при подальшій експлуатації [1].





Рисунок 1 – Зовнішній вигляд дна кузова напівпричіпа вантажного автомобіля

Джерело: [1]

В досліджуваній моделі використовувалися ребра жорсткості бортів, які виготовлені із матеріалу товщиною $t=4$ мм, шириною полки $b=55$ мм, висотою $h=153$ мм, радіусом скруглення $R=3,75$ мм та листового покриття дна кузова товщиною $t=4$ мм. Також в даній модель розміщені косинки під кутом $\alpha=45^\circ$ з обох боків внутрішньої частини кузова шириною $b=150$ мм, товщиною $t=3$ мм.

Для проведення дослідження напружено-деформованого стану (НДС) кузова вантажного автомобіля, засобами системи тривимірного моделювання SolidWorks створено САД - модель кузова з сіткою кінцевих елементів з глобальним розміром 30 мм та допуском 1,5 мм (рис. 2). Прикладена сила на об'єкт складала $P=200$ кН, матеріал – сталь звичайної якості Ст3пс ГОСТ 380-88.

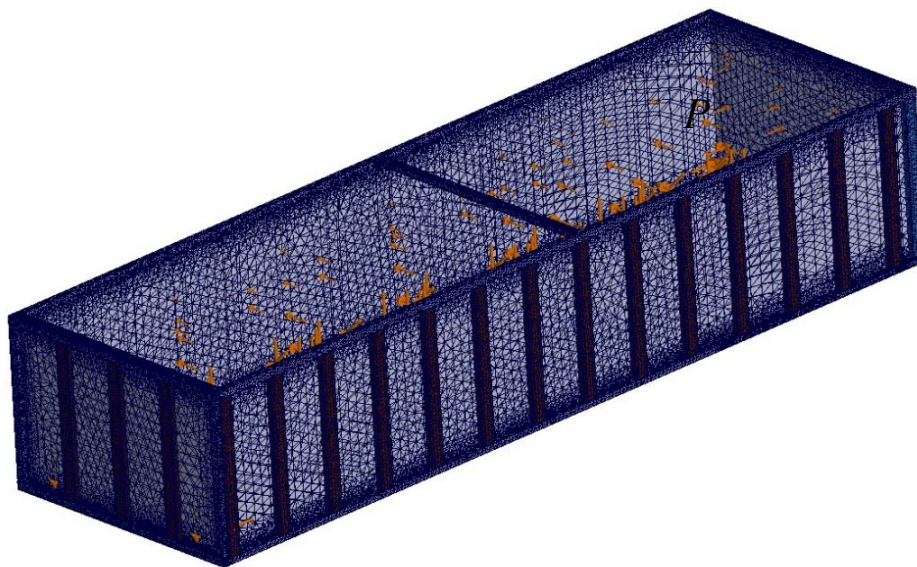


Рисунок 2 – Сітка кінцевих елементів на моделі кузова вантажного автомобіля

Джерело: розроблено автором

Умови закріплення кузова та прикладення зовнішнього навантаження зображено на рис. 2-3.

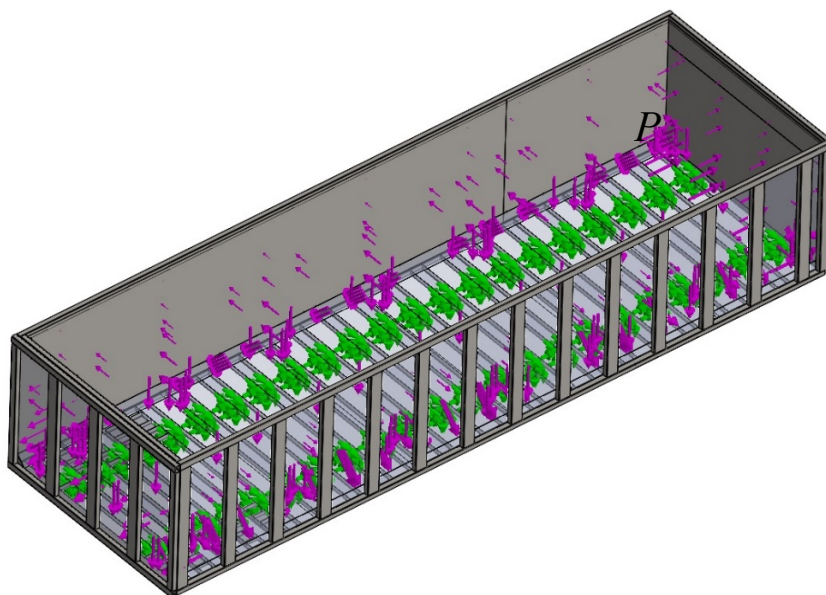


Рисунок 3 – Умови закріплення та прикладення навантаження у CAD - моделі кузова вантажного автомобіля

Джерело: розроблено автором

На рис. 4 зображено розміщення ребер жорсткості на дні та боках кузова вантажного автомобіля (з порядковими номерами від 1 до 23 та від 1 до 15), причому під порядковим номером 1 дна розміщено профільну трубу розміром 60 мм.

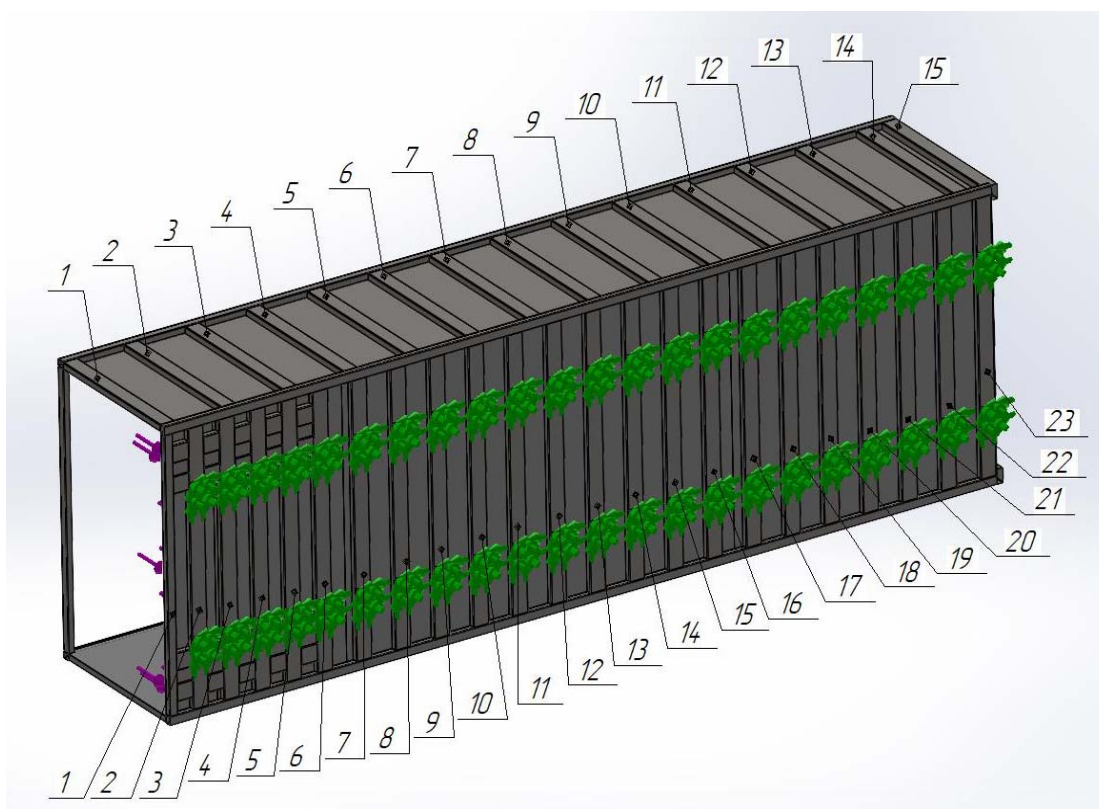


Рисунок 4 – Схема розміщення ребер жорсткості кузові вантажного автомобіля

Джерело: розроблено автором

При дослідженні дна кузова проводилася зміна кількості та місця розташування перемичок.

Отримані результати подано у таблиці 1, 2 на рис. 5-8.

Таблиця 1 – Розрахункові статичні напруження, що діють на ребра жорсткості дна кузова вантажного автомобіля, МПа

К-сть перемичок	Позиція ребра жорсткості дна кузова											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	39,99	184,05	114,03	79,04	72,42	74,82	73,1	63,51	66,9	70,13	58,41	57,19
1	33,47	134,82	71,25	48,66	43,05	42,24	41,07	34,87	35,12	39,57	37,23	36,13
2	27,92	98,67	49,6	43,09	38,7	40,48	37,58	33,86	33,69	33,44	27,19	24,06
3	27,86	95,5	47,71	38,51	34,61	35,37	35,55	32,1	31,97	33,19	28,32	26,07
К-сть перемичок	Позиція ребра жорсткості дна кузова											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
0	61,78	53,08	41,75	37,48	41,32	26,59	22,55	17,24	18,22	27,68	128,28	
1	38,81	34,22	26,3	18,9	17,92	22,49	20,76	17,53	20,14	30,5	104,31	
2	24,63	23,86	19,44	18,16	17,09	13,76	15,41	19,38	21,69	30,54	90,25	
3	26,49	23,58	18,08	15,2	15,35	12,89	16,02	20,57	22,53	32,96	87,86	

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 – Результати дослідження максимальних статичних переміщень ребер жорсткості дна кузова вантажного автомобіля, мм.

К-сть перемичок	Позиція ребра жорсткості дна кузова											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,280	0,260	0,270	0,280	0,290	0,30	0,320	0,330	0,330	0,340	0,330	0,330
1	0,210	0,20	0,210	0,210	0,210	0,210	0,220	0,210	0,210	0,20	0,180	0,170
2	0,180	0,170	0,170	0,170	0,170	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,150	0,150
3	0,180	0,170	0,170	0,170	0,170	0,160	0,160	0,160	0,150	0,150	0,140	0,140
К-сть перемичок	Позиція ребра жорсткості дна кузова											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
0	0,330	0,310	0,310	0,280	0,260	0,220	0,190	0,120	0,090	0,050	0,050	
1	0,160	0,150	0,150	0,150	0,140	0,130	0,110	0,090	0,070	0,050	0,040	
2	0,150	0,140	0,130	0,120	0,110	0,090	0,080	0,070	0,050	0,040	0,040	
3	0,130	0,130	0,120	0,110	0,10	0,090	0,080	0,060	0,050	0,040	0,040	

Джерело: розроблено автором

Таблиця 3 – Розрахункові статичні напруження, що діють на косинку, МПа

К-сть перемичок	Позиція бокових ребер жорсткості														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	23,36	4,49	6,17	8,47	9,44	11,55	12,74	13,16	12,55	13,2	12,66	12,83	9,33	5,36	3,26
1	15,57	3,75	5,88	6,9	5,71	5,81	3	2,82	3,47	6,38	6,44	8,42	6,59	3,48	4,69
2	14,74	2,88	3,35	3,67	2,96	3,84	4,27	4,96	4,05	4,21	5,21	4,92	4,07	3,55	7,82
3	2,75	1,44	2,59	1,35	2,02	1,09	0,93	1,25	2,59	1,29	4,33	1,08	1,61	2,36	0,51

Джерело: розроблено автором

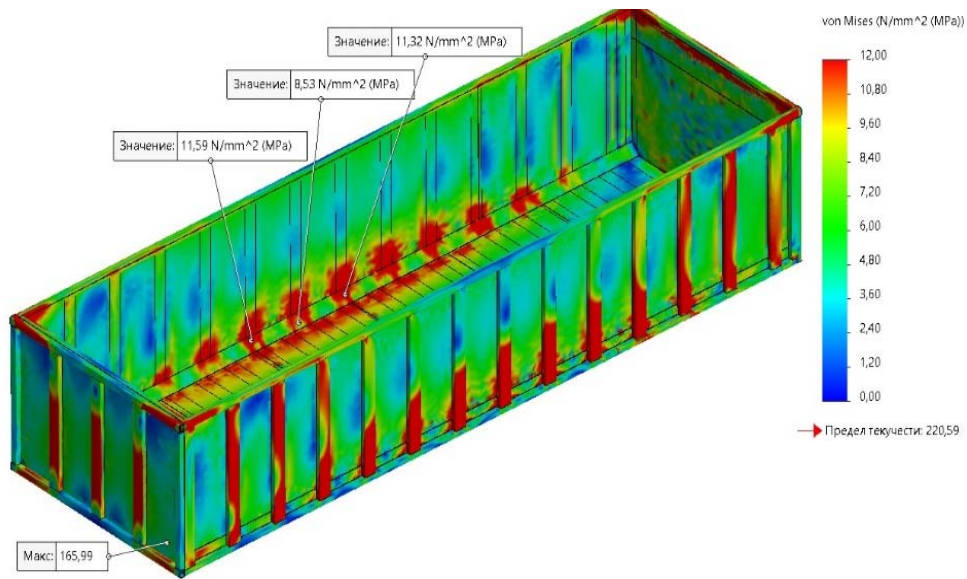


Рисунок 5 – Статичне напруження, що діє на косинку без встановлення перемичок ($\alpha = 45^\circ, b = 150 \text{ мм}, t = 3 \text{ мм}, \text{МПа}$)

Джерело: розроблено автором

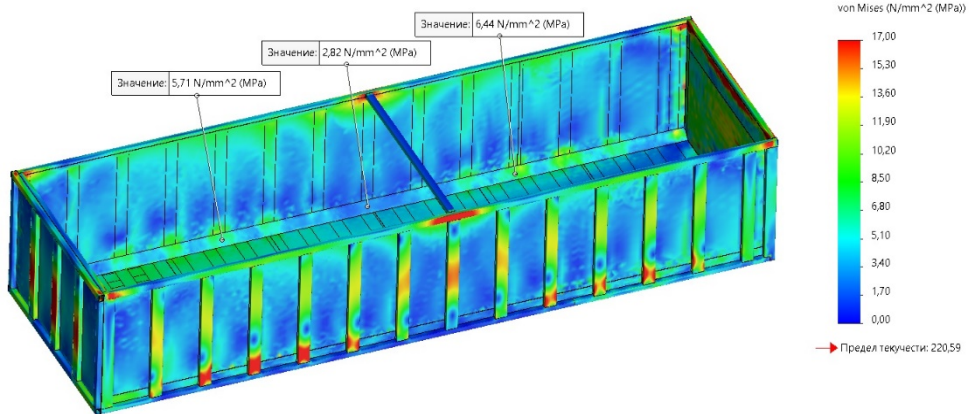


Рисунок 6 – Статичне напруження, що діє на косинку при встановленні 1 перемички ($\alpha = 45^\circ, b = 150 \text{ мм}, t = 3 \text{ мм}, \text{МПа}$)

Джерело: розроблено автором

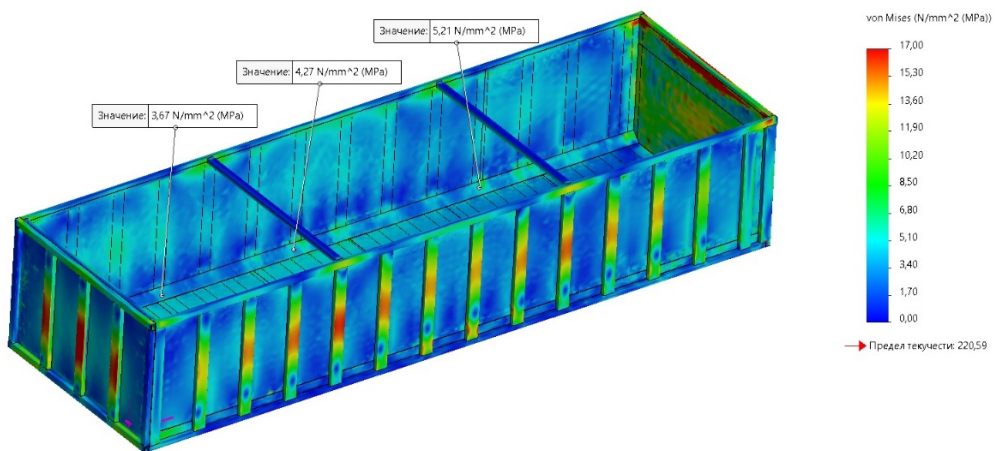


Рисунок 7 – Статичне напруження, що діє на косинку при встановленні 2-х перемичок ($\alpha = 45^\circ, b = 150 \text{ мм}, t = 3 \text{ мм}, \text{МПа}$)

Джерело: розроблено автором

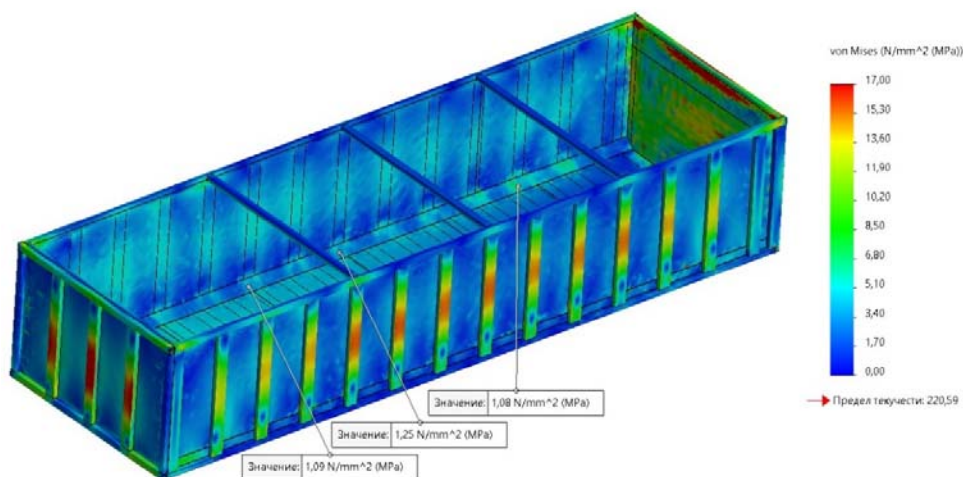


Рисунок 8 – Статичне напруження, що діє на косинку при встановленні 3-х перемичок ($\alpha = 45^\circ, b = 150 \text{ мм}, t = 3 \text{ мм}, \text{МПа}$)

Джерело: розроблено автором

На основі отриманих результатів побудовано залежність статичного напруження та переміщення в ребрах жорсткості дна кузова, а також залежність статичного напруження, що виникають на косинках в залежності від кількості та місця розміщення перемичок на кузові кузова (рис. 9-11).

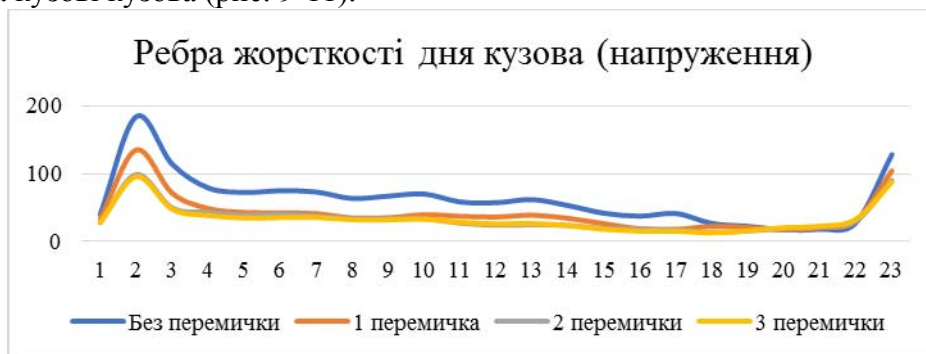


Рисунок 9 – Статичне напруження в ребрах жорсткості дна кузова в залежності від кількості та місця розташування перемичок (ребра жорсткості: $t_p = 3 \text{ мм}, t_{\text{л.дна}} = 4, \sigma_T = 206,8$; косинки: $\alpha = 45^\circ, b = 150 \text{ мм}, t = 3 \text{ мм}, \text{МПа}$)

Джерело: розроблено автором

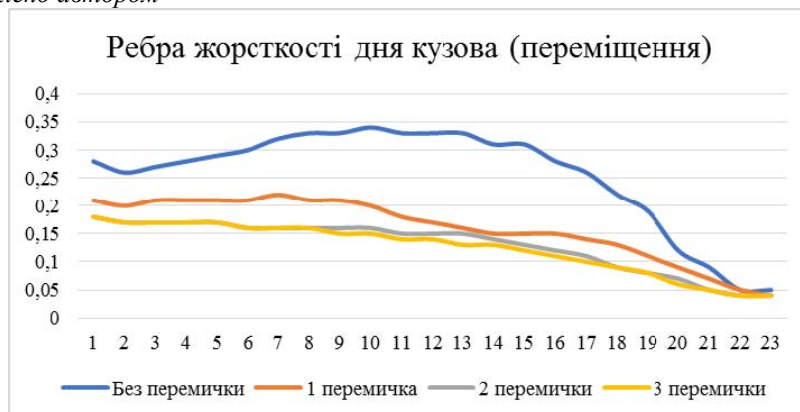


Рисунок 10 – Статичне напруження, що діє на косинку в залежності від кількості та місця розташування перемичок (ребра жорсткості: $t_p = 3 \text{ мм}, t_{\text{л.дна}} = 4, \sigma_T = 206,8$; косинки: $\alpha = 45^\circ, b = 150 \text{ мм}, t = 3 \text{ мм}, \text{мм}$)

Джерело: розроблено автором

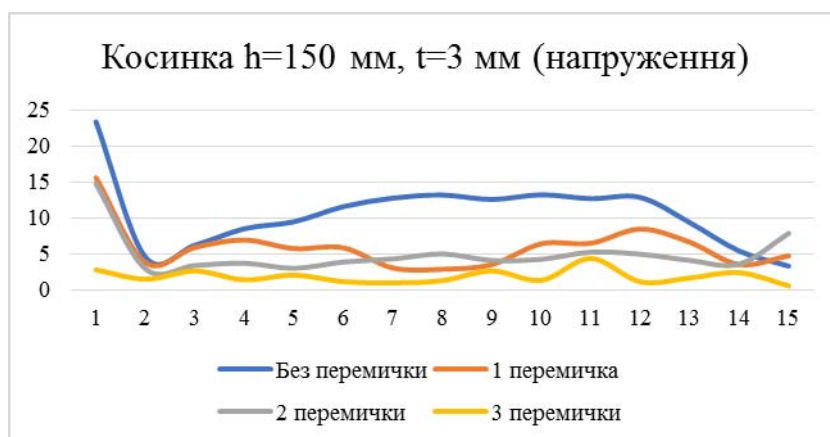


Рисунок 11 – Статичне напруження в ребрах жорсткості дна кузова в залежності від кількості та місця розташування перемичок ($\alpha = 45^\circ$, $b = 150$ мм, $t = 3$ мм, МПа)

Джерело: розроблено автором

Висновки. Використовуючи розроблену САД-модель кузова напівпричіпа вантажного автомобіля, аналіз напружено-деформованого стану дає змогу перевірити закономірності розподілу напружень в елементах кузова. Дані дослідження показали залежність рівня напружень та різного виду деформацій елементів кузова в залежності від кількості, а також від розміщення перемичок. Ідентифікацію критичних елементів кузова напівпричіпа з точки зору несучої здатності. Результати, отримані після проведення даних досліджень, служать основою для прийняття інженерних рішень, спрямованих на вдосконалення конструкції кузова вантажного напівпричіпа.

Список літератури

1. Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричіпа вантажного автомобіля / О.Л. Ляшук, та ін. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал*. 2021. № 1 (24). С 93-103.
2. K Vamshi Krishna, K Yugandhar Reddy, K Venugopal, and K Ravi. Design And Analysis of Truck Body for Increasing the Payload Capacity. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 263. 062065.
3. Sankararao Vinjavarapu1, Unnam Koteswararao2, V. Lakshmi Narayana. *Design Optimization of Tipper Truck Body. International Journal of Engineering Research and Development*. 2012, Vol. 4, Issue 9 (November 2012), Pp. 11-20.
4. Структурний синтез кузова напівпричіпа вантажного автомобіля з техніко-економічним обґрунтуванням / Ів.Б. Гевко та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. ІІ. С. 186-194.
5. Rohan Y Garud, Shahid C Tamboli, Dr. Anand Pandey Structural Analysis of Automotive Chassis. *Design Modification and Optimization International Journal of Applied Engineering Research*, 2018. Vol. 13, Number 11. pp. 9887-9892.
6. V. Raghavendra Prasad Nayak, Ch. Sambaiah . Design and Analysis of Dumped Body. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2013. Vol. 2, Issue 3 . 2231-6477.
7. Техніко-економічне обґрунтування виготовлення кузова напівпричіпа вантажного автомобіля / Ів.Б. Гевко та ін. *Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики* : матеріали Міжнар. наук.-практ. кон., 29-30 вересня 2022 р., Тернопіль, 2022. С. 171-172.
8. N. Nagendra Kumar, B. Jithendra, Malaga. Anil Kumar . Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles . *International Journal of Engineering Research and Development*. 2013, Vol. 2, Issue 10 (October 2013), pp.1884 - 1893.
9. Ramacharan C., Prashanth A.S. Design and analysis of Dump Truck Floor Bed . *International Journal of Engineering Research and Development*. 2015, Vol. 3, Issue 06, 2015. Pp. 706-710.

10. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів. Технологія: підр. Київ: Знання-Прес, 2007. 527с.
11. Буренніков Ю.А., Кашканов А.А., Ребедайло В.М. Рухомий склад автомобільного транспорту: робочі процеси та елементи розрахунку : навч. посіб. Вінниця: ВНТУ. 2009. С. 267.
12. KUANG-HUA CHANG . Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion . English, 2020.
13. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Основи методу скінченних елементів: навч. посіб. Чернівці: ЧДТУ, 2007. 288 с.

References

1. Liashuk, O.L., Hevko, I.B., Levkovich, M.H., Vovk, Yu.Ia. Stashkiv, M.Ia. & Kapskyi, D.V. (2021). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu dna kuzova napivprycheпа vantazhnoho avtomobilia [Research of the stressed-deformed state of the bottom of the truck semi-trailer]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii: naukovyi zhurnal – Scientific bulletin of the Kherson State Maritime Academy: scientific journal*, 1 (24), 93-103 [in Ukrainian].
2. K Vamshi Krishna, K Yugandhar Reddy, K Venugopal, & K Ravi (2017). Design And Analysis of Truck Body for Increasing the Payload Capacity. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 263, 062065 [in English].
3. Sankararao Vinjavarapu1, Unnam Koteswararao2, V. Lakshmi Narayana. (2012). Design Optimization of Tipper Truck Body. *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 4, Issue 9 (November 2012), pp. 11-20 [in English].
4. Hevko, Iv.B., Rohatynskiy, R.M., Liashuk, O.L. & Levkovich, M.H. (2022). Teslia Strukturnyi synteз kuzova napivprycheпа vantazhnoho avtomobilia z tekhniko-ekonomichnym obgruntuvanniam [Structural synthesis of the truck semi-trailer body with technical and economic justification]. *Zbirnyk naukovykh prats. Tsentralnourainskyi naukovyi visnyk – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue № 5(36), part II*, 186-194 [in Ukrainian].
5. Rohan Y Garud, Shahid C Tamboli, Dr. Anand Pandey (2018). Structural Analysis of Automotive Chassis. *Design Modification and Optimization International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 13, Number 11, pp. 9887-9892 [in English].
6. B. Raghavendra Prasad Nayak, Ch. Sambaiah. (2013). Design and Analysis of Dumped Body. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Vol. 2, Issue 3*, 2231-6477 [in English].
7. Hevko, Iv.B., Rohatynskiy, R.M., Liashuk, O.L., Levkovich, M.H. & Teslia, V.O. (2022). Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia vyhotovlennia kuzova napivprycheпа vantazhnoho avtomobilia [Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia vyhotovlennia kuzova napivprycheпа vantazhnoho avtomobilia]. Processes, machines and equipment of agro-industrial production: problems of theory and practice: *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia (29-30 veresnia 2022, Ternopil) – International Science and Practice Conf.* (pp.171-172) [in Ukrainian].
8. N. Nagendra Kumar, B. Jithendra, Malaga. Anil Kumar . (2013). Optimization of Weight and Stress Reduction of Dump For Automotive Vehicles . *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 2, Issue 10 (October 2013), pp.1884 - 1893 [in English].
9. Ramacharan, C., Prashanth, A.S. (2015). Design and analysis of Dump Truck Floor Bed . *International Journal of Engineering Research and Development. Vol. 3, Issue 06*, 2015. Pp. 706-710 [in English].
10. Ludchenko, O.A. (2007). *Tekhnichna ekspluatatsiia i obsluhovuvannia avtomobiliv. Tekhnolohiia: pidruchnyk [Technical operation and maintenance of cars. Technology]*. Kyiv: Znannia-Pres [in Ukrainian].
11. Buriennikov, Yu.A., Kashkanov, A.A. & Rebedailo, V.M. (2009). *Rukhomyi sklad avtomobilnoho transportu: robochi protsesy ta elementy rozrakhunku [Road transport rolling stock: work processes and calculation elements]* . Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
12. KUANG-HUA CHANG (2020). Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion . English [in English].
13. Dubenets, V.H., Khilchevskiy, V.V. & Savchenko, O.V. (2007). *Osnovy metodu skinchennykh elementiv [Fundamentals of the finite element method]*. Chernihiv: ChDTU [in Ukrainian].

Ivan Hevko, Prof., DSc., **Yuriy Pyndus**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykhailo Levkovich**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Teslia**, PhD tech. sci., **Andriy Gupka**, PhD tech. sci., **Maria Sipravska**, assist. Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

Study of the Stress-Deformation State of the Bottom of the Semi-Trailer Truck Body Depending on the Placement of the Jumpers

The purpose of this article is to study the influence of the geometric parameters of the elements of the bottom of the body of a truck semi-trailer on its stress-strain state.

To solve this problem, a combination of analytical, numerical and experimental methods is used to investigate the stress-strain state of the structure in car bodies.

With help of the stress-strain method, a comprehensive study of the bodies of cargo semi-trailers was carried out, which led to the development of innovative engineering solutions aimed at increasing their technical and economic indicators. This was achieved by analyzing the influence of various factors on the structure and design features. The research results were obtained on the basis of the stress-strain state (SST) using advanced methods of engineering analysis, in particular, using the specialized SolidWorks software complex on a CAD model representing the body of a semi-trailer truck.

The results obtained after conducting these studies serve as the basis for making engineering decisions aimed at improving the design of the truck body.

truck, semi-trailer, construction, stress-strain state, geometric parameters

Одержано (Received) 20.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 26.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 69.01

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.190-195](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.190-195)

І.О. Скриннік, доц., канд. техн. наук, **М.О. Федотова**, канд. техн. наук, **В.В. Дарієнко**, доц., канд. техн. наук, **С.О. Джирма**, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький Україна

Досвід та тенденції розвитку монолітного будівництва при зведенні будівель та споруд

В даній роботі розглянуто будівництво монолітних, панельних та цегляних будинків, проведений аналіз кожного з будинків, визначені їх переваги та недоліки при будівництві в Україні. Висвітлений аналіз літературних джерел, що в свою чергу показав, що зведення будівель та споруд при монолітному будівництві буде мати набагато економічний характер у витратах і відповідно буде відбуватись будівництво з прискоренням, а строки експлуатації самих споруд та будівель з монолиту в порівнянні з панельними та цегляними будуть відрізняються в десятки років. Монолітне будівництво використовується для створення повністю жорсткої рамки з різних видів форм. У нашій країні багато років вважали за краще збірні конструкції. Хоча можна відзначити, що за останні 30 років - час конструктивізму - набуває досвід монолітне будівництво. Після настав час «цегли», потім активно просували будівництво з панелей, і тільки за останні 10 років можна сказати, що монолітне будівництво зайняло своє законне місце.

монолітний будинок, панельний будинок, цегляний будинок, монолітне будівництво

Постановка проблеми. Будівництво – одна з найважливіших і потужних галузей народного господарства. Продукт функціонування будівельної галузі це цивільні, промислові, житлові та інші будівлі. Будівельна галузь в Україні пов'язана з величезними матеріальними витратами, де скорочення яких досягається використанням правильних будівельних матеріалів, використання полегшених конструкцій, та застосування новітніх технологій у будівництві.

Багато років підряд в Україні будинки житлові багатоповерхові будували з цегли, різні об'єкти в промисловості, будівлі адміністративного значення, а також 2-3 поверхові котеджі. В багатьох випадках технологія будівництва з використанням цегляної кладки тепер відійшла на другий план, поступаючи місцем більш монолітному будівництву, то в свою чергу в будівництві малоповерховому лідируючі позиції цегли поки непорушні [3, 9].

Використання в будівництві монолітних конструкцій, які в свою чергу легші від збірних, звідси буде зменшуватись кількість матеріалу, яка необхідна буде для будівництва фундаменту і, відповідно, знижується сукупна вартість об'єкта [12]. Строк будівництва відповідних конструкцій буде зменшуватись, які необхідні для монтажу та зведення будинків багатоповерхових з цегли. А окрім вище перерахованого, такі показники як теплонепроникності, та звуконепроникності, в зрівнянні з будівельними технологіями іншого плану можуть підвищуватись в кілька разів.

В Україні набуло особливої актуальності питання підвищення енергоефективності за останні роки [1, 10]. Одним з основних шляхів забезпечення національної безпеки, це підвищення енергоефективності національної економіки України, вирішення відповідних проблемних соціальних проблем та наповнення бюджетного фонду.

Будівлі та споруди по теплоізоляції мають на меті декілька практичних цілей: це по перше підвищення комфортного рівня з звуко та тепловими показниками та економію паливних ресурсів. Відповідно, енергоефективність використання традиційних джерел енергії в спорудах та будівлях буде виражатися певними факторами.

Основним питанням в сучасному будівництві не тільки для України, а і для всіх країн, є зменшення ваги власної тих конструкцій які використовуються. Даним питанням зацікавлені дослідники і інженери з приводу пошуку ефективних способів зменшення конструктивної ваги елементів каркасів будівель, а саме міжповерхових перекриттів, і особливо в монолітних безбалкових перекриттях, які показують себе як найбільш довговічних, і технологічних при масовому будівництві. Даними проблемами, постановкою ряду завдань та досліджень, які виникають та охоплюють спектр в монолітному будівництві займалися відповідні вчені [1, 8, 12, 13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальним і теоретичним дослідженням монолітного будівництва та пов'язаних з ними питань міцності конструкцій присвятили роботи Ю.Г. Аметов, І.Д. Белов, В.Н. Кебенко, І.Г. Людковський, А.Ф. Маренін, А.І. Міщенко, М.В. Микула, В.Ф. Пенц, Г.П. Передерій, Е.Д. Чихладзе, І.С. Яровий та багато інших науковців [1, 3, 8, 9, 11, 12]. Розглянуті можливі способи зміцнення, завдяки яким можлива суттєва економія сталі при будівництві будівель, що дозволить підвищити техніко-економічні характеристики конструкції [1, 8]. В даному варіанті присвячені роботи С.В. Ковриги, Л.І. Стороженка, М.В. Микули, О.В. Демченко, А.Л. Кришана. Слід зазначити, що вивченню безбалкових перекриттів і їх елементів присвячені праці Бабича Є.М. [2], Карпюка В.М. [12], Колякової В.М. [13] та ін. Даною розробкою також займалися закордонні вчені такі як: Rozvany G. Aims, Shmukler V., Babaev V, Tae-Young Jang, Sang-Mo Kim, Sang-Dae Kim, Yegupov K., Murashko O., Dorofeev V [14-17].

Постановка завдання. Метою даної роботи є порівняльний аналіз монолітного, панельного та цегляного будівництва будинків, опис їх переваг та недоліків при будівництві в Україні. В свою чергу викладений аналіз літературних джерел, який показав, що будівництво з моноліту в житлових будинках є більш економічний та вдалий, і може носити масове будівництво для житлових мікрорайонів і строк служби таких будівель набагато більша ніж цегляних та панельних будинків.

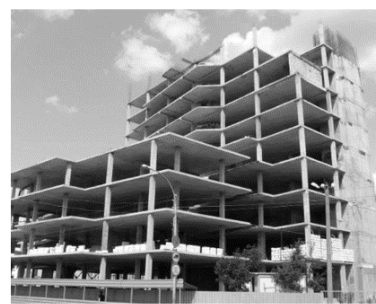
Виклад основного матеріалу. Панельні та цегляні будинки (рис.1, а) мають багато об'єктивних переваг. Цегляні будинки, мають досить довгий і надійний термін експлуатації, вони можуть експлуатуватися століттями, при цьому вони не потребують складного догляду. Стіни в таких будинках дихають. Такі будинки досить швидко нагріваються та досить довго утримують тепло. Стіни цегляних будинків без проблем обробляються зсередини, а зовні будинки оздоблюються різними будівельними матеріалами. Кладка стін в цегляних будинках і так гарна по собі, що можна стіни будинку зовні нічим не обшивати.



а) цегляний



б) панельний



в) монолітний

Рисунок 1 – Види житлових будинків

Джерело розроблене авторами

Але не слід вважати досить ідеальними цегляні та панельні будинки, вони мають ряд недоліків. Якщо бути об'єктивним насправді, монолітні будинки, будинки з бетонних блоків, та будинки каркасні і використання сучасних технологій за певними показниками мають певну перевагу, перед цегляними будинками, а саме, для нормальної теплоізоляції стін будівлі, стіни повинні бути дуже товсті з цегли. Відповідно застосовують утеплення стін. Будинки побудовані з цегли - насамперед, найдорожчі з усіх видів будматеріалу. Досить значна буде витрата розчину та цегли. Кладка стін повинна бути виконана якісною, що в свою чергу теж має певну вартість, будівництво має досить довгий термін, малий розмір цеглин, ретельність з якою відбуваються роботи, для отримання відповідної якості кладки. Ще одним мінусом є те що, проводити мурування цегли не можна при температурах мінусових, що обмежує будівництво теплою порою року.

Будівництво монолітне (рис 2, б) одна з найбільших перспективних технологій зведення споруд та будівель. Перевагами такого будівництва, є висока його швидкість будівництва, доволі гнучкість в архітектурних та планувальних рішеннях та досить висока стійкість до факторів навколишнього середовища. Збільшення ширини монолітних будинків дозволяє не тільки заощадити матеріали, а і на 20-30% знизити витрати тепла на обігрів будинку. Будинки монолітний майже не має швів, що покращує показники тепло- і звукопроникності [12].

В будівництві така технологія дозволяє монтувати та зводити будинки і споруди в короткі строки, що є безперечною перевагою. Головна технологія при такому будівництві, це – монтаж арматури, опалубки, та вкладання бетону. Така конструкція досить сейсмічно стійка, та міцно тримає форму будинку, стіни при моноліті рівні, стеля та підлога, відлиті з бетону, все це при будівництві позбавлені швів та раковин, що забезпечує добру звукоізоляцію.

Огляд літературних джерел показав [2, 8, 13], що будівництво монолітне має певні переваги в порівнянні з панельними та цегляним житловим будівництвом. Витрати, як енергетичні на виготовлення та зведення монолітних конструкцій будуть зменшуватись на 25-35% в порівнянні з цегляними та збірними: а самі трудовитрати будуть знижуватись в середньому на 25-30%, строки будівництва будуть скорочуватись на 10-15% в порівнянні з панельними та цегляним будівлями. Загальна вартісна оцінка будівель з архітектурно-планувальним рішенням та діючих норм на матеріали і конструкції в середньому на 10% будуть нижче, ніж панельного чи цегляного будинку.

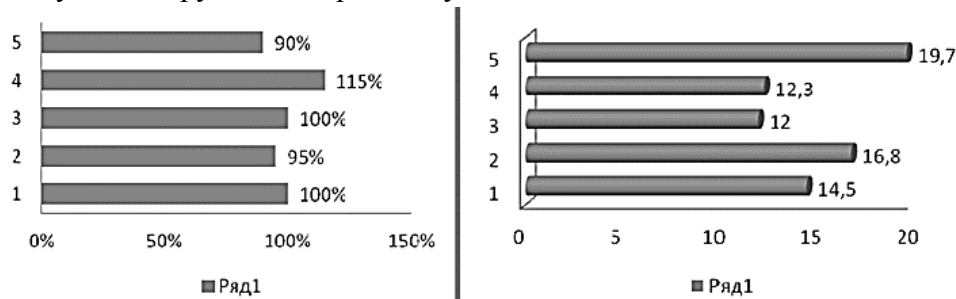
Таблиця 1 – Переваги і недоліки панельного, цегляного і монолітного будинків

Цегляний та панельний будинок		Монолітний будинок	
Переваги	Недоліки	Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none"> - Будівля має міцність; - будівля довговічна; - в будівлі стіни дихають; - гарна шумоізоляція при використанні залізобетонних плит перекриття; - стіни мають декоративну конфігурацію цегли; Стіни піддаються подальшій обробці. 	<ul style="list-style-type: none"> - вартість будівництва висока; - маса будівлі велика - будівельні роботи виконуються в сезон 	<ul style="list-style-type: none"> - при будівництві стелі і стіни одразу готові до обробки. - технологічний будівельний процес прискорюється до 10 разів. - Великий строк експлуатації - Будівництво проходить цілий рік без перерви. 	<ul style="list-style-type: none"> - При будівництві стіни зводяться безпосередньо на будівельному майданчику, що проконтролювати якість робіт практично неможливо; - будинок має високу матеріалоемність.

Джерело розроблене авторами

Строк експлуатації монолітного будинку складає від 150 до 300 років, а його конструктивні особливості в свою чергу дають можливість витримати будівлю при землетрусі силою до 8 балів. В свою чергу будинки з цегли мають строк служби від 100 до 150 років, а панельного і ще менше до 50 років.

Нижче на діаграмах наведені декілька варіантів типів будинків у порівнянні витрат металу в конструкції та вартості будівництва.



Діаграма вартості, %

Діаграма на витрати металу в конструкції, кг/м²

1-«КПД» серії 90, 2- каркасна монолітна система «КУБ –1», 3- цегляний будинок, 4- каркасна система побудованих в умовах «ИМС», 5- монолітний безригельний каркас

Рисунок 2 – Діаграми порівняльні при будівництві будинків

Джерело розроблене авторами

Висновки:

1. Безумовно, будинки панельні та цегляні у всі часи вважалися для проживання найкращими, так як для їх будівництва використовувалась керамічна цегла будівельна. Такі будівлі здатні «дихати» і та регулювати мікроклімат усередині приміщення. Такі будівлі гарно тримають тепло, і дозволяють економити на опаленні.

2. В будівництві в теперішній час панельні та цегляні будинки зводять дуже рідко, а зводять більше монолітні будівлі, що в свою чергу дозволяє збільшити поверховість будівлі та строк служби, і придати будівлі різноманітний архітектурний вигляд.

3. В цілому не можна однозначно сказати, який будинок ліпший з точки зору будівельної конструкції – монолітний, панельний, чи цегляний, так як вони не відрізняються за своїми експлуатаційними характеристиками.

Список літератури

1. Бабаєв В.М. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем . Київ: Сталь, 2017. 404с.
2. Бабич Є.М. Безкапітельнобезбалкові конструктивні системи для будівель доступного житла: конструктивні особливості, умовності розрахунків, пропозиції з удосконалення. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди* . 2014. Вип. 29. С. 451–460.
3. Бамбура А.М. Індустріальна безкапітельно-безбалкова конструктивна система і нові конструктивно-технологічні рішення основ і фундаментів на основі сучасних будівельних матеріалів для зведення доступного житла та об'єктів інфраструктури. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 155. С. 53–61.
4. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ . [Чинний від 2009-12-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 48 с. (Державні будівельні норми України).
5. ДБН А.3.1-5-2016. Організація будівельного виробництва. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 51 с. (Державні будівельні норми України).
6. ДБН В.1.1.7-2016 . Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 39 с. (Державні будівельні норми України).
7. ДБН В.2.3-20-2008. Споруди транспорту. Мости та труби. Виконання та приймання робіт. [Чинний від 2008-08-01]. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-155> (дата звернення: 04.05.2023).
8. Демчина Б.Г. Особливості розрахунку багатоплитних плит перекриття на ПК «ЛІРА». *Сучасне промислове та цивільне будівництво* . 2009. №4. С. 179–185.

9. Дорофеев В. С. Міцність та тріщиностійкість залізобетонних балкових конструкцій за дії малоциклових знакопостійних і знакозмінних навантажень високих рівнів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2016. Вип. 10. С. 13–26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mttdp_2016_10_4 (дата звернення: 15.05.2023).
10. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. (Національний стандарт України).
11. Карпюк В.М. Розрахунок міцності просторових перерізів прогінних залізобетонних конструкцій при їх згині з крученням за удосконаленою інженерною методологією. *Наука та будівництво* . 2018. №4. С. 18–27.
12. Колякова В.М. Розрахунково-теоретичні дослідження розподілу температури в перерізі залізобетонної конструкції східчастих складок. *Будівельні конструкції. Теорія і практика: наук.-техн. збірник*. Київ : КНУБА, 2017. Вип. 1. С.149–157.
13. Rozvany G. Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Struct Multidisc Optim* . 2001. 21. Pp. 90–108.
14. Shmukler V. New constructive solutions for building of transport construction facilities. *MATEC Web of conferences*. 2017. Vol.116. 02004. 19p.
15. Tae-Young Jang, Sang-Mo Kim, Sang-Dae Kim. New Eco-friendly Two-way Void Slab. P. 671-676. URL: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB17410.pdf> (last accessed: 15.05.2023).
16. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. UK, 2005. 21 p.
17. Yegupov K. Problem of nonconformity of computational model and results of vibration tests of multistory buildings with girderless construction. Ovidius University . *Annals Series: Civil Engineering*. 2015. Issue 17. Pp. 55–60.

References

1. Babaiev, V.M., Buhaievskiy, S., Evel, S.M., Yevzerov, I.D., Shevetovskiy, V.V., Shymanovskiy, O.V. & Shmukler, V.S. (2017). *Chyselni ta eksperymentalni metody ratsionalnoho proektuvannia ta zvedennia konstruktyvnykh system* [Numerical and experimental methods of rational design and construction of structural systems]. Kyiv, "Stal" [in Ukrainian].
2. Babych, Ye.M., Pavlikov, A.M. & Mykytenko, S.M. (2014). Bezkapitelno-bezbalkovi konstruktyvni systemy dlia budivel dostupnoho zhytla: konstruktyvni osoblyvosti, umovnosti rozrakhunkiv, propozyzii z udoskonalennia [Capital-free and beam-free structural systems for affordable housing buildings: design features, calculation conventions, suggestions for improvement]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy – Resource-saving materials, constructions, buildings and structures. Issue 29*, 451–460 [in Ukrainian].
3. Bambura, A.M., Pavlikov, A.M., Zotsenko, M.L. & Tymoshenko, S.A. (2015). Industrialna bezkapitelno-bezbalkova konstruktyvna systema i novi konstruktyvno-tekhnolohichni rishennia osnov i fundamentiv na osnovi suchasnykh budivelnykh materialiv dlia zvedennia dostupnoho zhytla ta obektiv infrastruktury [Industrial capital-free and beam-free structural system and new structural and technological solutions of bases and foundations based on modern building materials for the construction of affordable housing and infrastructure facilities]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport, Issue 155*, 53–61 [in Ukrainian].
4. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktii ta osnov [General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, building structures and foundations.]. (2009). *DBN V.1.2-14-2009. from 01 December, 2009*. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy (Derzhavni budivelni normy Ukrainy) [in Ukrainian].
5. Orhanizatsiia budivelnogo vyrobnytstva [Organization of construction production]. (2016). *DBN A.3.1-5-2016. from 01 December, 2017*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 51 s. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy) [in Ukrainian].
6. Pozhezhna bezpeka obektiv budivnytstva. Zahalni vymohy [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). *DBN V.1.1.7-2016 from 06 June , 2017*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy) [in Ukrainian].
7. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Vykonannia ta pryimannia robit. [Transport facilities. Bridges and pipes. Execution and acceptance of works]. *DBN V.2.3-20-2008. from 01 August, 2008*. Retrieved from <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-155> [in Ukrainian].
8. Demchyna, B.H., Rutkovska, I.Z. & Vozniuk, L.I. (2009). Osoblyvosti rozrakhunku bahatosharovykh plyt perekryttia na PK «LIRA» [Peculiarities of calculation of multi-layer floor slabs on PC "LIRA"].

- Suchasne promyslove ta tsyvilne budivnytstvo – Modern industrial and civil construction*, 4, 179–185 [in Ukrainian].
9. Dorofiev, V.S., Karpiuk, V.M., Albu, K.I., Somina, Yu.A. (2016). Mitsnist ta trishchynostiikist zalizobetonnykh balkovykh konstruksii za dii malotsyklovykh znakopostiinykh i znakozminnykh navantazhen vysokyykh rivniv [Strength and crack resistance of reinforced concrete beam structures under the action of low-cycle constant-sign and sign-changing loads of high levels]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice, Issue 10*, S. 13–26. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mtt dp_2016_10_4 [in Ukrainian].
 10. Konstruksii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksii z vazhkoho betonu. Pravyla proektuvannia. [Structures of buildings and structures. Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules.] (2011). *DSTU B V.2.6-156:2010. from 01 June, 2011*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 123s. (Natsionalnyi standart Ukrainy) [in Ukrainian].
 11. Karpiuk, V.M., Dorofiev, V.S., Petrov, O.M. & Petrov, M.M. (2018). Rozrakhunok mitsnosti prostorovykh pereriziv prohinykh zalizobetonnykh konstruksii pry yikh zghyni z kruchenniam za udoskonaleniou inzhenernoi metodolohiiei [Calculation of the strength of the spatial cross-sections of the reinforced concrete constructions when they are bent with torsion according to the improved engineering methodology]. *Nauka ta budivnytstvo – Science and construction*, 4, 18–27 [in Ukrainian].
 12. Koliakova, V.M. & Bozhynskiy, M.O. (2017). Rozrakhunkovo-teoretychni doslidzhennia rozpodilu temperatury v pererizi zalizobetonnoi konstruksii skhidchastykh skladokv [Computational and theoretical studies of temperature distribution in the cross-section of a reinforced concrete structure with stepped folds]. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka: Nauk.-tekhn. zbirnyk – Building structures. Theory and practice: science and technology. collection, Issue 1*, 149–157 [in English].
 13. Rozvany, G. (2001). Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Struct Multidisc Optim*, 21, Pp. 90–108 [in English].
 14. Shmukler, V. & Babaev, V. (2017). New constructive solutions for building of transport construction facilities. *MATEC Web of conferences, Vol 116*, p 02004. 19p. [in English].
 15. Tae-Young Jang, Sang-Mo Kim, Sang-Dae Kim. New Eco-friendly Two-way Void Slab [Електронний ресурс]. Retrieved from <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB17410.pdf> [in English].
 16. The European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. UK, 2005. 21 p.
 17. Yegupov, K., Murashko, O., Dorofiev, V. & Mihailov, O. (2015). Problem of nonconformity of computational model and results of vibration tests of multistory buildings with girderless construction. *Ovidius University Annals Series: Civil Engineering. Issue 17*, Pp. 55–60 [in English].

Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Darienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Stanislav Jirma**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Experience and Development Trends of Monolithic Construction in the Construction of Buildings and Structures

In this paper, the construction of monolithic, panel and brick buildings is considered, an analysis of each of the buildings is carried out, their advantages and disadvantages are determined during construction in Ukraine. An analysis of literary sources was also carried out, which showed that the monolithic construction of residential buildings is more economical in costs and is built faster, and the service life of a monolithic building compared to panel and brick buildings is tens of years.

Monolithic construction is used to create a completely rigid frame from various types of forms. In our country, for many years prefabricated structures were preferred. Although it can be noted that over the past 30 years - the time of constructivism - monolithic construction has gained experience. After the time of "bricks" came, then construction from panels was actively promoted, and only in the last 10 years can we say that monolithic construction has taken its rightful place. The construction of monolithic buildings and structures allows to reduce the total reduced costs by 13-25% compared to prefabricated construction. At the same time, the construction of buildings and structures in sliding formwork requires a highly qualified workforce and a clear organization of work. Using modern plastic sliding formwork during the construction of buildings allows you to perform concreting not around the clock, but with breaks, using special additives to concrete mixtures. For example, hardening retarders allow you to extend the setting period up to 18 hours.

Organizational and technological improvement of work management is associated with the use of movement maps of sliding formwork, which reflect technological interruptions, correct and timely installation of hole formers, embedded parts and reinforcement filling, care of concrete and other works.

monolithic house, panel house, brick house, monolithic construction

Одержано (Received) 19.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 24.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 691.88

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.196-203](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.196-203)

І.О. Скриннік, доц., канд. техн. наук, **М.О. Федотова**, канд. техн. наук,
В.В. Дарієнко, доц., канд. техн. наук, **О.А. Кислун**, доц., канд. техн. наук
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький
Україна*

Є.О. Томаченко, голова відокремленого підрозділу гільдії інженерів тех. нагляду в
Кіровоградській обл.
*Відокремлений підрозділ гільдії інженерів технічного нагляду в Кіровоградській
області, м. Кропивницький Україна*

Досвід використання сучасної опалубки при зведенні монолітних будинків в місті Кропивницькому

В даній статті висвітлюється процес будівництва в будівельній галузі новітніми технологіями, був виконаний огляд практика впровадження інновацій за кордоном. Висвітлений процес застосування технологій інноваційних в монолітному будівництві, а саме впровадження нанотехнологій, та використання автоматизації робіт. Будівництво в цілому потребує новітніх інноваційних технологій у житлове будівництво. Введення в будівництво, сучасних тенденцій, та застосування нових будівельних матеріалів та технологій в розвинутих країнах світу, що дозволяє стверджувати, на ближчі 10-20 років стануть технології і матеріали, отримані на основі досягнень і розробок в області монолітного будівництва.

кесоне перекриття, монолітне будівництво, сучасна пластикова опалубка, будівництво, арматурний каркас, зведення будівлі

Постановка проблеми. Використання монолітного будівництва – є найпопулярнішим перспективним напрямком в будівельній галузі в усьому світі. Ця технологія дозволяє в малі строки зводити споруди та будівлі будь-якої складності та поверховості. Це процес зведення будівель із залізобетону, який представляє собою залізну конструкцію (каркас), залиту бетоном. Завдяки твердості металу і міцності цементного покриття ці конструкції здатні витримувати колосальні навантаження, тим самим забезпечуючи довговічність будівель [2, 8, 10].

Маючи безліч переваг перед іншими видами будівництва, ця технологія використовується як в цивільному, так і в промисловому будівництві. Її застосовують при будівництві приватних будинків, житлових комплексів, офісних центрів, складських приміщень, гаражів, резервуарів і басейнів і т.п. Якість зведення монолітного будинку залежить від правильного виконання будівельних робіт з використанням спеціального обладнання та матеріалів на всіх технологічних етапах його будівництва [1, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним з питань сучасній будівельній галузі не тільки для України, а і в усьому світі, є найскладніша задача, це зменшення власної ваги конструкцій [7]. Актуальність даного питання підтверджується зростаючим інтересом [1, 2], який спостерігається з боку інженерів та дослідників до ефективних способів полегшення конструктивних елементів каркасів будівель [9], а саме міжповерхових перекриттів, та в монолітних безбалкових перекриттях, як

надійних і технологічних при масовому будівництві. Цій технології присвячені праці Бабица Є.М., Бамбури А.М., Банаха В.А. [3], Бережної К.В., Вознюка Л.І., Головка Д.В., Демчини Б.Г., Дорофєєва В.С. Аналізуючи проблеми в даному питанні, що охоплюють весь комплекс монолітного будівництва [2, 3, 4, 5], в достатній мірі висвітлили теоретичні питання в області технології, механізації будівництва та організації наступні вчені: Атаєва С.С., Буднікова М.С., Гончаренко Д.Ф., Савйовського В.В. та ін. Даною розробкою також займалися закордонні вчені такі як: Rao B.N., Jasiczak J., Querin O.M., Kitamura H., Querin O.M., Steven G.P [12-17].

Роботи та методики дослідження пустотних монолітних плит перекриття присвячені роботи Мельника І.В., Санникова І.В., Артюха В.Г. [1] Тонкачєєва Г.Н., Таран В.В., Яловєнко В.І. Роботи наукової школи, що функціонує під керівництвом проф. В.С. Шмуклера, а саме наукові праці Бережної К.В., Бугаєвського С.О., Помазана М.Д., Стебловського І.А., присвячені експериментальним та теоретичним дослідженням. В роботі Стебловського І.А. наведені результати раціоналізації параметрів конструкції перекриття полегшеного типу.

Постановка завдання. Метою даної роботи є використання в монолітному будівництві пластикової опалубки для будівництва монолітних стін, та опалубки для кесонного монолітного перекриття, та використання автоматичного пістолета для в'язання арматурного каркасу перед бетонними роботами.

Виклад основного матеріалу. Монтаж та зведення монолітних будівель та споруд в свою чергу при будівництві дозволяє знижувати, як загальні приведені витрати на 13-25% в порівнянні зі збірним будівництвом. Монтаж та зведення споруд та будівель в ковзаючій опалубці вимагає при будівництві висококваліфіковану робочу силу та чітку організації робіт при монолітному будівництві. Використовуючи сучасну пластикову ковзаючу опалубку при зведенні будинків дозволяє виконувати бетонування не цілодобово, а з перервами. Організаційно-технологічне вдосконалення ведення робіт пов'язано з використанням карт руху ковзаючої опалубки, які показують технологічні перерви, установку деталей закладних та каркасу арматурного, а також догляд за бетоном та інші роботи.

Технологія монолітного будівництва в Україні вийшла на ринок, де розрахункова економічна здійсненність проекту також не враховувала вартість матеріалів і вартість робіт і пов'язані з ними витрати [1, 8]. Розмірковуючи про житлове будівництво, збірні будинки йдуть в минуле, тому західні будівельні фірми рідко використовують їх, вважаючи за краще будівництво будинків з моноліту. З такою технологією стає дешевша робоча сила, праця виконується один раз.

Монолітне будівництво починається з установки опалубки. Опалубка являє собою конструкцію з міцних щитів різних конфігурацій, на основі яких і створюються необхідні форми. В залежності від конкретного випадку і типу виконуваних робіт використовують різні опалубні системи. Монолітне будівництво може використовувати опалубку для горизонтальних або вертикальних поверхонь (рис. 1, 2), в залежності від матеріалу опалубка буває дерев'яною, металевою, деревометалевою, залізобетонною [11]. Система гнучкої пластикової опалубки має широку сферу застосування: опалубку фундаментних плит, стрічкових фундаментів, басейнів, застосування в дорожньому будівництві, використання в ландшафтному дизайні.

Таку опалубку використовували при будівництві монолітного будинку Євгеном Олександровичем Томаченком в м. Кропивницькому, де зведення будівлі відбувалось монолітне, починаючи з фундаменту, стін та кесонного перекриття (рис.1, 2)



Рисунок 1 – Загальний вигляд вертикальної опалубки для зведення будівель монолітного типу
Джерело розроблене авторами



Рисунок 2 - Загальний вигляд горизонтальної опалубки для бетонування монолітного перекриття на телескопічних тріногах
Джерело розроблене авторами

При складанні вертикальних щитів опалубки як скріплюючого матеріалу використовують стяжний гвинт певної довжини. Довжина гвинта залежить від архітектурних особливостей будівлі, що зводиться. Оскільки стяжні гвинти і гайки є дорогими матеріалами і використовуються багаторазово, дуже важливий їх захист при заливці бетону і збереження після розопалублювання для подальшого використання. З цією метою стяжний гвинт поміщають в трубку, який кріплять з двох кінців спеціальними конусами. Конуси забезпечують щільний контакт захисної трубки з опалубною поверхнею і запобігають можливому потраплянню бетону всередину трубки. Трубка може бути виготовлена з фібробетона або поліетилену. Поліетиленова труба - найпоширеніша при монтажі опалубки. Цей матеріал є найдешевшим, але має ряд недоліків. Така трубка не дає необхідної жорсткості конструкції опалубки. Альтернативним рішенням може бути ПВХ труба, порізана на смужки 2 - 3,5 м. ПВХ труба забезпечує необхідну жорсткість опалубці і менше піддається деформаціям під силою бетону.

Якщо опалубка встановлюється для спорудження вертикальних стін, перед цією операцією відбувається монтаж арматурного каркаса. При укладанні горизонтальних монолітних плит перекриття спочатку монтується горизонтальна опалубка, а після

цього на неї встановлюється каркас з арматури. Для надійної фіксації арматури в «тілі» бетону необхідними елементами виступають фіксатори захисного шару. Вони потрібні для створення і точного витримання товщини захисного шару. Після влаштування цих елементів приготований бетон заливають в конструкцію опалубки.

Використання в будівництві новітніх інноваційних технологій, зокрема таких як в'язання арматурних хлестів за допомогою автоматизованих пістолетів, що відповідно буде значно зменшувати тривалість таких робіт [1, 7]. Таку автоматизацію для в'язання арматурних каркасів і використовував Є.О. Томаченко на своєму будівництві (рис.3). Роботи які виконуються із заливання бетоном однієї стіни на ділянці, проходить в три види робіт: по-перше це зв'язування арматурних стержнів (хлестів) в арматурний каркас, по друге це встановлення опалубки, і останній з етапу – це заливання бетону в опалубку. Встановлення чи монтаж опалубки займає десь 10-15 % зі всього часу роботи, а заливання бетонної суміші – біля 20 %. Відповідно, що 55 % часу витрачається на зв'язування арматурних стержнів, і поки не зав'язана арматура, не можна проводити інші будівельні роботи [5].

Поява пневматичного пістолету вперше на ринку будівельного інструменту з робочим тиском 20 бар, з'явився завдяки розробкам видатних японських інженерів фірми МАХ. Такий пістолет, для в'язання арматури диво техніки визнано кращою інновацією в монолітному будівництві за останні десятиріччя. 99 % в'язальних пістолетів і витратних матеріалів йде в США і Європу [2, 9].

Зв'язування такою машиною одного вузла арматури менше однієї секунди, а відповідно за хвилину з врахуванням перестановки пістолета на нове місце для в'язання арматури, тобто близько 52 вузли можна зав'язати за хвилину. Відповідно такий пістолет замінює шістьох людей, і дає вільний час для проведення робіт на іншому будівельному об'єкті (рис. 3).

Житлове будівництво в ковзаючій опалубці має певну структуру технологічної гнучкості. Використовуючи один комплект опалубки, методом її переналагодження можна зводити будинки та споруди різних форм та типів, представляючи їм певну архітектурну цілісність та виразність. Деяку складність в роботі представляє процес зведення перекриттів. Є кілька видів перекриттів, які використовуються при будівництві та зведенні будівель і споруд. Вони мають певні переваги і недоліки. Одним з ефектних різновидів є кессоне перекриття. Воно застосовується рідше, ніж монолітні плити. Але при цьому у нього є маса переваг.

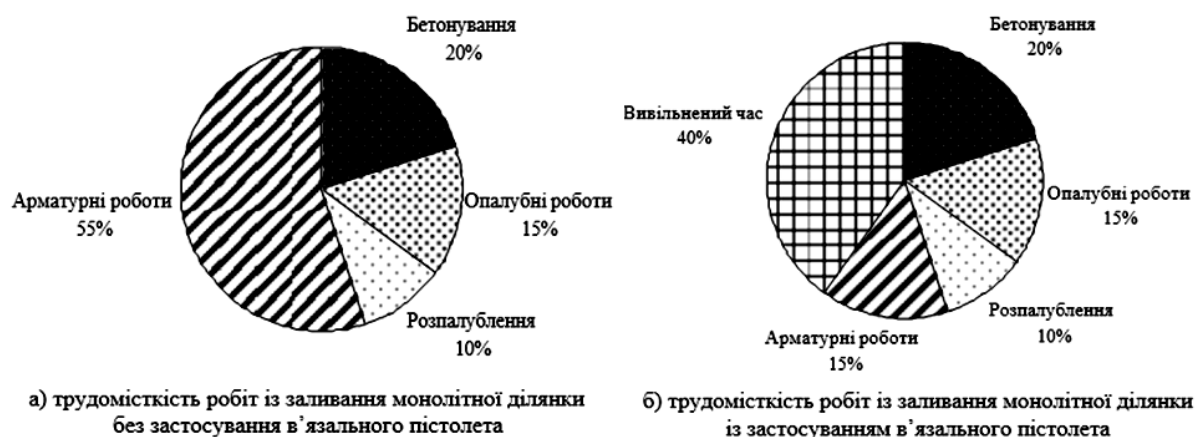


Рисунок 3 Діаграми розподілу трудомісткості

Джерело розроблене авторами

Сьогодні зустріти проект будівлі з таким перекриттям важко. Саме це і приваблює багатьох будівельників. Інтер'єр при використанні цієї технології виходить оригінальним. Будь яке перекриття є важливим елементом будови.



Рисунок 4 – Загальний вигляд кесонного перекриття

Джерело розроблене авторами

Таке кесоне перекриття застосував при монолітному зведенні будівлі Є.О. Томаченко (рис. 4). Воно являє собою ребристу конструкцію з взаємно перпендикулярно розташованими армованими ребрами. Застосування монолітного ребристого перекриття в порівнянні з плоскими плитами або стандартним монолітним перекриттям знижує власну вагу перекриття до 40 %, зменшує використання бетону до 60%, за рахунок видалення його з нижньої розтягнутої зони. При цьому жорсткість конструкції самої плити підвищується. Це дозволяє влаштовувати великі прольоти без використання додаткових опор до 18 метрів, що дає ще більше простору. Таким чином, використання кесонних перекриттів має ряд серйозних переваг з економічної і технологічної точок зору. Такий тип ефективною конструкції вже оцінили і широко застосовують у США та країнах Європи для зведення муніципальних будівель, торгово-розважальних, офісних і бізнес центрів, складів та промислових об'єктів [2, 9]. Такий спосіб зручний не тільки при будівництві нових будівель, але і для переобладнання і відновлення великих об'ємних будівель багатофункціональних центрів. У країнах з підвищеною сейсмічною активністю набирає оборот та будівництво житлового фонду за цією технологією.

Процес монтажу опалубки починається з настилу під розмір кесонноформуєчих форм, потім ці елементи легко встановлюються в проектні положення стик в стик між собою і стандартною плоскою опалубкою. Цей легкий процес не займає багато часу. Далі необхідно пов'язати проектний арматурний каркас і встановити опалубні щити по периметру перекриття. При необхідності можна використовувати мастило для опалубки. Потім приступають до подачі бетонної суміші, для якісного укладання, суміш вібрують. Демонтаж проводиться після досягнення перекриттям необхідної міцності. Цей процес також простий і безпечний, а форми легко дістаються з перекриття. В результаті отримується полегшене залізобетонне перекриття, яке не втратило міцності. При цьому збільшили корисний простір під ним,

використовуючи мінімум колон, і заощадили і час і гроші на роботах і матеріалах. Така опалубка витримує більше 100 циклів заливки.

Висновки. На основі викладеного матеріалу зробимо узагальнення:

1. Монолітна конструкція легше на 15-20%, ніж тверда цегляна будівля. Значно зменшена товщина стін і стель. Завдяки спрощенню конструкції і ваги, зменшуються витрати на матеріали, відповідно, знижуються витрати на установку фундаментів.

2. Виробничий цикл переноситься на будівельний майданчик. Коли будуються збірні будинки, то будівельні вироби виробляються на заводі, доставляються на місце, монтуються. При виготовленні збірних конструкцій залишаються допуски на всіх етапах процесу, які призводять до додаткової роботи по обробці стиків. Якщо застосовується монолітна конструкція за установленною схемою, будівництво будинків здійснюється за більш короткий час. Крім того, якісна робота усуває необхідність у додатковій обробці. Стіни і стелі майже готові до обробки.

3. Монолітна будівля забезпечує практично «безшовний» дизайн. Це підвищує продуктивність тепло- і звукоізоляції. У той же час конструкція міцніша.

4. Відпрацьована і застосована технологія бетонування кесонних монолітних плит дає менше навантаження на стіни та колони. Це пояснюється зниженням ваги перекриття. Це, в свою чергу, призводить до скорочення сумарних навантажень, які діють на фундамент.

5. Кесонні плити перекриття стійкі до коливань, викликаних землетрусом. В районах підвищеної сейсмічної небезпеки при наявності прольоту більше 6 м.

6. Ребристі різновиди конструкцій відрізняються більшою в 2-3 рази несучою здатністю. Товщина при цьому може бути в 2 рази меншою, ніж при облаштуванні звичайних гладких перекриттів. Несучих елементів потрібно змонтувати менше, що прискорює процес будівництва.

7. Матеріаломісткість будівництва знижується. Витрати на будівництво помітно знижуються. В деяких випадках цей показник сягає 3 разів.

8. У кесонних перекриттях основу складають ребра. Завдяки їх наявності виходить знизити витрату цементу в 2 рази, а арматури – в 3 рази, в порівнянні із звичайним залізобетонним перекриттям аналогічної міцності.

Список літератури

1. Артюх В.Г. Досвід проектування та будівництва монолітних залізобетонних плит з циліндричними порожнинами в перекриттях цивільних будинків. *Будівництво України*. 2007. №4. С. 13 – 15.
2. Бабаєв В.М. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6.-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНІП 2.03.01-84 і EN 1992-1-1 (Eurocod 2) ; за заг. ред. В.С. Шмуклера. Харків: Золоті сторінки, 2015. 208 с.
3. Банах В. А. Урахування деформованого стану плит перекриттів, балконів та лоджій при моделюванні та розрахунках будівель у складних інженерно-геологічних умовах. *Містобудування та територіальне планування*. 2011. Вип. 39. С. 13–18.
4. Гапонова Л.В. Оцінка вогнестійкості конструктивно-анізотропної залізобетонної плити. *Будівельне виробництво: Міжвід. наук.-техн. зб. «Технічні науки»*. 2017. №62/1. С57–63.
5. Гончаренко Д.Ф. Точність – як показник статичної однорідності і стабільності технологічного процесу зведення висотних каркасно-монолітних будівників. *Журнал «Будівництво України»*. 2007. №7. С. 35–40.
6. ДБН В.2.6.-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування [Чинний від 2011-06-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71с. (Державні будівельні норми України).
7. Клімов Ю. А. Експериментальні дослідження міцності згинальних елементів з композитною склопластиковою арматурою. *Будівельні конструкції: теорія і практика*. 2018. Вип. 2. С. 179–184.
8. Колякова В.М. Розподіл температури в перерізі залізобетонної плити. *Сучасні технології та*

- методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць.* 2016. Вип. 5. С. 232–239.
9. Колякова В.М. Методи розрахунку залізобетонних монолітних перекриттів з порожнистими вкладишами. *Будівельні конструкції. Теорія і практика: наук.-техн. зб.* 2019. Вип. 5. С.15–23.
 10. Мельник І.В., Сорохтей В.М. Конструювання плоских монолітних залізобетонних перекриттів з використанням ефективних вставок різних форм. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва.* 2009. №655. С.190-199.
 11. Нікулін В.Б. Оцінка впливу розриву в бетонуванні плити перекриття системи «МОНОФАНТ» на її напружено-деформований стан. *УкрДУЗТ: зб. наук. праць.* 2019. Вип. 185. С. 61–70.
 12. Jan Dirk van der Woerd. Finding new forms for bearing structures by use of origamics. Proceedings of The 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), / 22-25 July 2012, Karlsruhe, Germany. Pp. 263–268.
 13. Jasiczak J. Construction of undulating walls using dry-mix shotcrete. Expansive concrete surface creates the main spatial element inside the Museum of the History of Polish Jews in Warsaw, Poland. *Concrete international* . 2015. Vol. 37, No. 6. Pp. 31–35.
 14. Kitamura H. Construction of prestressed concrete outer tank for LNG storage using high-strength self-compacting concrete. Proceedings of the International Workshop on Self- Compacting Concrete, 1999. Pp. 262–291.
 15. Quad-Lock: Concrete Building Solutions. Insulated Concrete Forms for Floors, Roofs, and Tilt-Up. URL: <http://www.icf-and-more-ok.com/green-building-182-products-suppliers-oklahoma-city-ok/quad-lock-icf-insulating-concrete-forms-okc.html> (last accessed: 15.05.2020).
 16. Rao B.N. Investigations on One-way Flexural Behaviour of Biaxial Voided Slab with Cuboid Shape Void Formers. *Journal of Structural Engineering (Madras)*. 2019. Vol. 46(4). Pp. 287–297.

References

1. Artiukh, V.H. & Sannikov, I.V. (2007). Dosvid proektuvannya ta budivnytstva monolitnykh zalizobetonnykh plyt z tsylindrychnymy porozhnynamy v perekryttiakh tsyvilnykh budynkiv [Experience in the design and construction of monolithic reinforced concrete slabs with cylindrical cavities in the ceilings of civil buildings]. *Budivnytstvo Ukrainy – Construction of Ukraine*, 4, 13 – 15 [in Ukrainian].
2. Babaev, V.M., Bambura, A.M., Pustovoitova, O.M., Reznik, P.A., Stoianov, Ye.H. & Shmukler, V.S. (2015). Praktychnyi rozrakhunok elementiv zalizobetonnykh konstruksii za DBN V.2.6.-98:2009 u porivnianni z rozrakhunkamy za SNYp 2.03.01-84 i EN 1992-1-1 (Eurocod 2) ; V.S. Shmuklera (Eds.). Kharkiv: Zoloti storinky [in Ukrainian].
3. Banakh V. A., Hrebenuk O.V., Fostashchenko O.M. Urakhuvannya deformovanoho stanu plyt perekryttiv, balkoniv ta lodzhii pry modeliuvanni ta rozrakhunkakh budivel u skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh. Mistobuduvannya ta terytorialne planuvannya. Vyp. 39, 2011. S. 13–18. [in Ukrainian].
4. Haponova L.V., Hrebenuk S.S., Reznik P.A. Otsinka vohnestiikosti konstruktyvno-anizotropnoi zalizobetonnoi plyty. Mizhvidomchyi naukovy- 170 tekhnichnyi zbirnyk (tekhnichni nauky) «Budivnele vyrobnytstvo». Kyiv, 2017. №62/1. S57–63 [in Ukrainian].
5. Honcharenko D.F., Karpenko Yu.V., Meiersdorf K.I. Tochnist – yak pokaznyk statychnoi odnorodnosti i stabilnosti tekhnolohichnoho protsesu zvedennia vysotnykh karkasno-monolitnykh budivnykiv. Zhurnal «Budivnytstvo Ukrainy». 2007, №7. S. 35–40. [in Ukrainian].
6. DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruksii. Osnovni polozhennia proektuvannya [Chynnyi vid 2011-06-01]. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 71c. (Derzhavni budivelni normy Ukrainy). [in Ukrainian].
7. Klimov Yu. A. Eksperymentalni doslidzhennia mitsnosti zghynalnykh elementiv z kompozytnoiu skloplastykovoio armaturoiu. Budivelni konstruksii: teoriia i praktyka, Vyp. 2, 2018. S. 179–184. [in Ukrainian].
8. Koliakova V.M., Bozhynskyi M.O., Fesenko O.A. Rozpodil temperatury v pererizi zalizobetonnoi plyty. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: Zbirnyk naukovykh prats, Lutsk: NTU, Vyp. 5, 2016. s. 232–239. [in Ukrainian].
9. Koliakova V.M., Kripak V.D., Skopets V. Metody rozrakhunku zalizobetonnykh monolitnykh perekryt z porozhnystymy vkladyshamy. Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka: Nauk.-tekhn. zbirnyk. K., KNUBA, Vyp. 5, 2019. S.15–23. [in Ukrainian].
10. Melnyk, I.V. & Sorokhetei, V.M. (2009). Konstruiuvannya ploskykh monolitnykh zalizobetonnykh perekryttiv z vykorystanniam efektyvnykh vstavok riznykh form [Construction of flat monolithic reinforced concrete floors using effective inserts of various forms]. *Visnyk Natsional'noho universytetu «Lviv'ska politekhnika». Teoriia i praktyka budivnytstva. – Bulletin of the Lviv Polytechnic National*

- University. Theory and practice of construction* 655, 190-199 [in Ukrainian].
11. Nikulin, V.B., Shmukler, V.S., Petrova, O.O., Reznik, P.A., Bohomaz, M.Iu. & Misiura, M.V. (2019). Otsinka vplyvu rozryvu v betonuvanni plyty perekryttia systemy «MONOFANT» na yii napruzhenodeformovanyi stan [Assessment of the effect of a break in the concreting of the floor slab of the "MONOFANT" system on its stress-strain state]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT – UkrDUZT: coll. of science works, Issue 185*, 61–70 [in Ukrainian].
 12. Jan Dirk van der Woerd. (2012). Finding new forms for bearing structures by use of origamics. *Proceedings of The 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22-25 July 2012, Karlsruhe, Germany*. Pp. 263–268 [in English].
 13. Jasiczak, J., Majchrzak, W. & Czajka, W. (2015). Construction of undulating walls using dry-mix shotcrete. Expansive concrete surface creates the main spatial element inside the Museum of the History of Polish Jews in Warsaw, Poland. *Concrete international, Vol. 37, No. 6*, Pp. 31–35 [in English].
 14. Kitamura, H., Nishizaki, T., Ito, H., Chikamatsu, R., Kamada, F. & Okudate, M. (1999). Construction of prestressed concrete outer tank for LNG storage using high-strength self-compacting concrete. *Proceedings of the International Workshop on Self-Compacting Concrete*. Pp. 262–291 [in English].
 15. Quad-Lock: Concrete Building Solutions. Insulated Concrete Forms for Floors, Roofs, and Tilt-Up. Retrieved from <http://www.icf-and-more-ok.com/green-building-182-products-suppliers-oklahoma-city-ok/quad-lock-icf-insulating-concrete-forms-ok.html> [in English].
 16. Rao, B.N. & Radha Sagadevan. (2019). Investigations on One-way Flexural Behaviour of Biaxial Voided Slab with Cuboid Shape Void Formers. *Journal of Structural Engineering (Madras), Vol. 46(4)*, Pp. 287–297 [in English].

Ivan Skrynnik, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Marianna Fedotova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Victor Darienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleg Kislun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Yevgeny Tomachenko, head of the separate unit of the guild of technical supervision engineers in the Kirovohrad

Separate unit of the guild of technical supervision engineers in the Kirovohrad, Kropyvnytskyi, Ukraine

Experience of Using Modern Formwork in the Construction of Monolithic Buildings in the City of Kropyvnytskyi

This work highlights the extent to which the construction industry is equipped with the latest technologies, and analyzes the foreign practice of introducing innovations. An example of the application of innovative technologies in monolithic construction, in particular the use of work automation and the introduction of nanotechnology, is presented. The pace of development of the urban environment in general and construction in particular requires the introduction of innovative technologies in residential construction. The analysis of modern trends in the introduction of new construction technologies and materials in economically developed countries of the world allows us to assert that the basis of dynamic introduction into practice for the next 10-20 years will be materials and technologies obtained on the basis of achievements and developments in the field of monolithic construction. The rapid development of the latest technologies, on the one hand, involves the use of the achieved results of fundamental research in applied areas of the construction industry, and on the other hand, the development of monolithic construction itself is impossible without new approaches to the design and construction of objects.

The use of monolithic construction is one of the most popular and promising directions in the construction industry all over the world. Its technology makes it possible to erect buildings of any architectural complexity and number of floors in a short period of time. This is the process of building buildings from reinforced concrete, which is an iron structure (frame) filled with concrete. Due to the hardness of the metal and the strength of the cement coating, these structures are able to withstand enormous loads, thereby ensuring the durability of the buildings.

Having many advantages over other types of construction, this technology is used both in civil and industrial construction. It is used in the construction of private houses, residential complexes, office centers, warehouses, garages, reservoirs and swimming pools, etc. The quality of the construction of a monolithic building depends on the correct execution of construction works using special equipment and materials at all technological stages of its construction.

caisson floor, monolithic construction, modern plastic formwork, construction, reinforcement frame, building construction

Одержано (Received) 19.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 26.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 624.016: 624.046.2: 624.012.35 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.204-212](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.204-212)**О.В. Дроботя**, асп.*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
м. Полтава, Україна**e-mail: Sashamailboxxx@gmail.com*

Експериментальні випробування попередньо напружених несучих елементів огорожувальних конструкцій з холодноформованих сталевих профілів на косий згин

Несучими елементами легкого зовнішнього стінового огородження будівель слугують стінові прогони. Зовнішнім навантаженням на них є вертикальне навантаження від власної ваги стінового огородження та горизонтальне вітрове навантаження, що приблизно рівні між собою. Тому стінові прогони працюють на згин в двох площинах та їх необхідно проектувати рівномісними в цих площинах. У роботі автором досліджено можливість застосування та доведена доцільність попереднього напруження в одній площині сталобетонних прогонів із зменшеною металоємністю саме в цій площині.
стінові прогони, сталобетон, попереднє напруження, експериментальні випробування, косий згин

Постановка проблеми. Несучими елементами легкого зовнішнього стінового огородження будівель слугують стінові прогони. Конструктивно такі стінові прогони являються горизонтальними балковими елементами [4]. Зовнішнім навантаженням на стінові прогони є вертикальне навантаження від власної ваги стінового огородження та горизонтальне вітрове навантаження. Таким чином, стінові прогони працюють на згин в двох площинах або так званого в умовах косоного згину [6]. Широке застосування елементів, що працюють в умовах косоного згину, вимагає всебічного теоретичного та експериментального дослідження їх роботи [5].

Легке сучасне стінове огородження влаштовують із навісних сандвіч-панелей, що складаються із двох листів профільного стінового настилу та ефективного жорсткого мінераловатного утеплювача між ними. Навантаження від власної ваги такого стінового огородження приблизно рівне вітровому навантаженню на території України. Тому в цьому випадку стінові прогони проектують рівномісними в двох площинах. Для з'ясування реальної роботи косозігнутих елементів необхідне визначення всіх параметрів, які можуть впливати на картину руйнування таких елементів [3, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі різні способи раціонального регулювання зусиль у сталевих конструкціях, які реалізуються як на стадії проектування, так і на стадії виготовлення і монтажу. До основних і найбільш поширених з них можна віднести:

- *спосіб попереднього деформування.* Здебільшого цим способом регулюють напруження в окремих стержневих елементах [11]. Попереднє деформування елементів влаштовують вигином, що протилежний експлуатаційному;
- *влаштування локальних затяжок* на сталевих частинах балкових конструкцій в зоні дії максимального згинального моменту. Ізбашом М.Ю. Доведена ефективність встановлення затяжок як по нижньому поясу балок при однопролітній

схемі їх роботи, так і по верхньому поясу над опорами при нерозрізній схемі [2];

– *влаштування додаткових попередньо напружених арматурних стержнів (затяжок) у розтягнутій зоні перерізу згинаних суцільних та просторових сталезалізобетонних конструкцій.* Позитивним результатом такого способу регулювання зусиль є підвищення несучої здатності та жорсткості сталезалізобетонних конструкцій [1]. Одночасно з перевагами, загальним недоліком перелічених трьох способів є додаткові витрати на матеріали та саме влаштування додаткових напружених стержнів;

– *спеціальна технологія виготовлення сталезалізобетонних конструкцій* результатом якої є зміна розрахункової схеми їх роботи [9]. Так, наприклад, виготовлення збірно-монолітних сталезалізобетонних ригелів виконується у декілька етапів – збірна частина конструкції виготовляється на заводі, монолітна частина – у процесі монтажу. На першому етапі ригель являє собою вільно обперту на двох опорах однопролітну балку. На другому етапі виготовлення після монтажу збірних ребристих залізобетонних плит перекриття та приварювання ригеля до закладних деталей колон, розрахункова схема ригеля змінюється на жорстко защемлену однопролітну.

Таким чином, ефективним способом попереднього напруження сталевих частини сталезалізобетонних конструкцій є їх попереднє деформування вигинами, що протилежні експлуатаційним [7]. Такі вигини влаштовують або домкратами, або шляхом влаштування додаткових попередньо напружених стержнів. При цьому попередньо зігнутий стан сталевих частини фіксується або зварюванням її складових частин під час виготовлення, або зміною умов закріплення цієї сталевих балкової частини з колонами, або власне влаштуванням напружених додаткових стержнів. Обетонування сталевих частини перерізу сталезалізобетонних конструкцій з метою фіксації її попередньо зігнутого стану детально не розглядалося [10].

Постановка завдання. Треба довести експериментальним шляхом можливості застосування попереднього напруження в одній площині сталобетонних прогонів із зменшеною металоємністю саме в цій площині; експериментальні дослідження роботи попередньо напружених сталезалізобетонних прогонів на косий згин.

Виклад основного матеріалу. *Загальні засади створення раціональних попередніх напружень у шарах сталобетонних прогонів.* Суть запропонованого комплексу заходів з раціонального перерозподілу зусиль полягає у наступному. На *першій стадії* виготовлення попередньо напружених сталобетонних прогонів за допомогою механічних домкратів створювався початковий протилежний експлуатаційному вигин сталевих частини балок (рис. 1, а). Тобто на цьому етапі створювалися деформації нормального перерізу сталевих балки протилежні експлуатаційним: нижні волокна балки стискалися, а верхні розтягувалися.

На *другій стадії* виготовлення виконувалося заповнення бетоном внутрішньої порожнини U-подібної сталевих частини стержня (рис. 1, б). Під час бетонування та на період набору бетоном проектної міцності домкрати під сталевими балками залишалися. Тобто напружено-деформований стан сталевих балок не змінювався у порівнянні із першою стадією (нижні волокна були стиснуті, а верхні розтягнуті), а деформації нормального перерізу в бетоні рівні нулю. Для забезпечення подальшої сумісної роботи сталевих та бетонних частин перерізу, заздалегідь до внутрішньої сторони сталевих частини перерізу були приварені анкерні засоби (рис. 2).

На корисне навантаження (*третьою стадією*) комбінований сталобетонний переріз працював сумісно (рис. 1, в). У бетонній частині деформації розвивалися від недеформованого (нульового) стану, у той час у сталевій частині деформації нормального перерізу накладалися на вже існуючі протилежні експлуатаційним

деформації, отримані на першій стадії роботи комбінованої конструкції. Тобто під час збільшення експлуатаційного навантаження сталеві частини балки спочатку поверталися у початковий недеформований стан і лише потім деформувалися по загальноприйнятій схемі: нижні волокна балки розтягувалися, а верхні стискалися.

Власне створенням попередніх вигинів, протилежних експлуатаційним, пояснює підвищення несучої здатності попередньо напружених таким чином сталобетонних конструкцій. Слід відмітити, що підбором оптимальних параметрів попереднього вигину сталевих частин балок та раціональним співвідношенням жорсткостей сталевих і бетонних частин досягнуто значного підвищення не тільки жорсткості сталобетонного стержня, а й його несучої здатності [10].

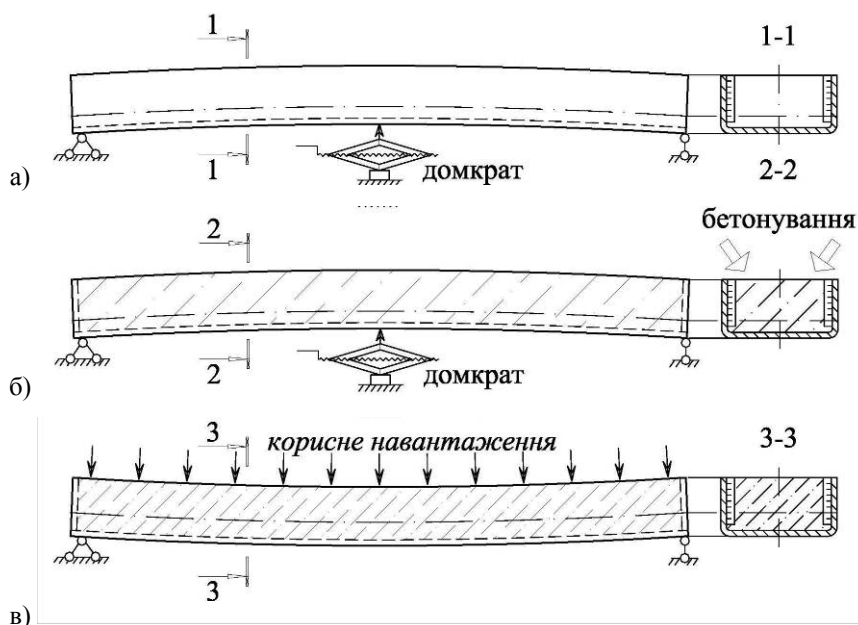


Рисунок 1 – Схеми створення попередньо напруженого сталобетонного прогону: а) сталевий елемент; б) перетворення сталевих елементів у сталобетонні; в) сталобетонний елемент

Джерело: розроблено автором

Конструкція експериментально досліджених попередньо напружених сталобетонних прогонів. Зразки попередньо напружених сталобетонних прогонів виготовлялися із сталевих гнутих швелерів №10 довжиною 3000 мм із зовнішнім габаритом перерізу 50×100 мм і товщиною стінки 3 мм із заповненою бетоном внутрішньою U-подібною порожниною. Попередньо напружені сталобетонні зразки, що були випробувані на косий згин, відрізнялися розміром поперечного перерізу (рис. 2). Зразки СБ1.3 і ПСБ1.3 заповнювалися бетоном в рівень із пером полиць швелера; загальна висота їх поперечного перерізу була рівна 50 мм, коефіцієнт армування склав 11,4% (розріз 1-1 на рис. 2). Зразки ПСБ 2.3 заповнювалися бетоном на 30 мм вище від рівня пера полиць швелера; загальна висота їх поперечного перерізу була рівна 80 мм, коефіцієнт армування склав 7,3% (розріз 1-1* на рис. 2). Для визначення ефективності виконання попереднього напруження сталевих частин перерізу були виготовлені зразки СБ1.3. Попередній вигин зразків рівний 10 мм, що складає 1/300 величини прольоту. Для визначення ефективності заповнення бетоном внутрішньої порожнини швелера були виготовлені та випробувані пусті сталеві зразки С1.3. Схема планування експериментальних досліджень показана на рисунку 3.

Зразки С1.3, СБ1.3, ПСБ1.3 і ПСБ2.3 завантажувалися двома зосередженими силами по центру прольоту у взаємно перпендикулярних площинах (рис. 4).

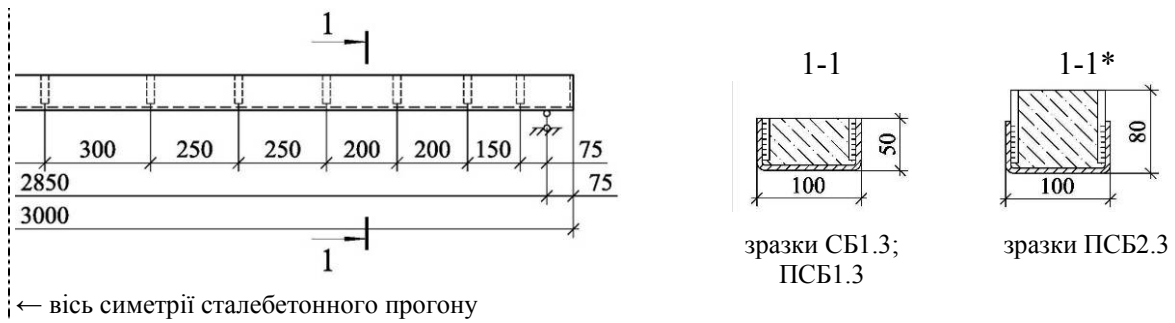


Рисунок 2 – Геометричні параметри дослідних однопролітних сталобетонних прогонів

Джерело: розроблено автором

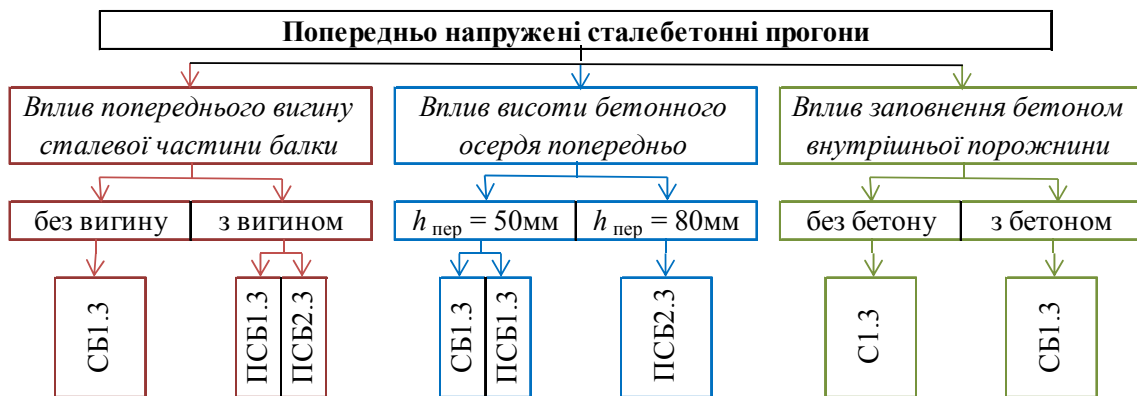


Рисунок 3 – Схема планування експериментальних досліджень сталобетонних прогонів

Джерело: розроблено автором

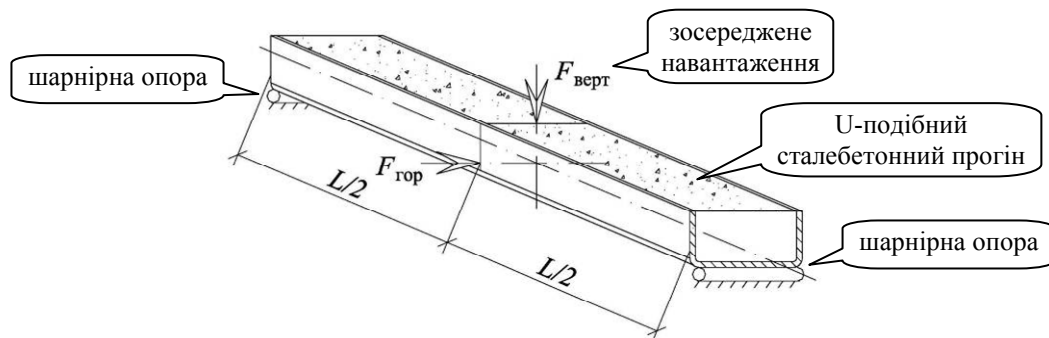


Рисунок 4 – Схема завантаження дослідних сталобетонних прогонів

Джерело: розроблено автором

Бетон заповнення внутрішньої порожнини та U-подібна сталеві частина сталобетонних прогонів поєднувалися в сумісну роботу за допомогою вертикальних арматурних стержнів класу А240С діаметром 6 мм довжиною 40 мм, що були приварені до внутрішньої сторони бокових полиць швелера із змінним кроком, показаним на рисунку 2. Крім цього, з метою заборони зсуву двох шарів один відносно одного по торцях балок були наварені пластини товщиною 4 мм. Тому досліджені сталобетонні прогони можна розглядати як двошарові композитні конструкції із жорстким поєднанням в сумісну роботу двох шарів (сталі та бетону).

Фізико-механічні характеристики використаних матеріалів для виготовлення зразків попередньо напружених сталобетонних прогонів (листової і круглої сталі та бетону) наведені у відповідних таблицях [10].

Методика проведення експериментальних досліджень попередньо напружених сталобетонних прогонів. Після набору бетоном проектної міцності, знімався домкрат (рис. 1), за допомогою якого створювався попередній вигин сталеві частини балки. На рисунку 5 показаний загальний вигляд сталобетонних прогонів під час проведення випробувань із вказуванням вузла прикладення навантаження.

Відносні поздовжні деформації сталі та бетону вимірювалися в зоні дії максимального згинального моменту (посередині прольоту) та на відстані 0,25 довжини прольоту від опор за допомогою електротензорезисторів з базою 20 мм (рис. 6). Для контролю деформацій в найбільш стиснутих і розтягнутих волокнах зразка були встановлені механічні тензометри Гугенбергера базою 20 мм із ціною поділки 0,005 мм, що забезпечило точність вимірювань відносних деформацій 25×10^{-5} . Для вимірювання прогинів посередині прольоту та на відстані 0,25 довжини прольоту від опор використовувалися індикатори годинникового типу [10].

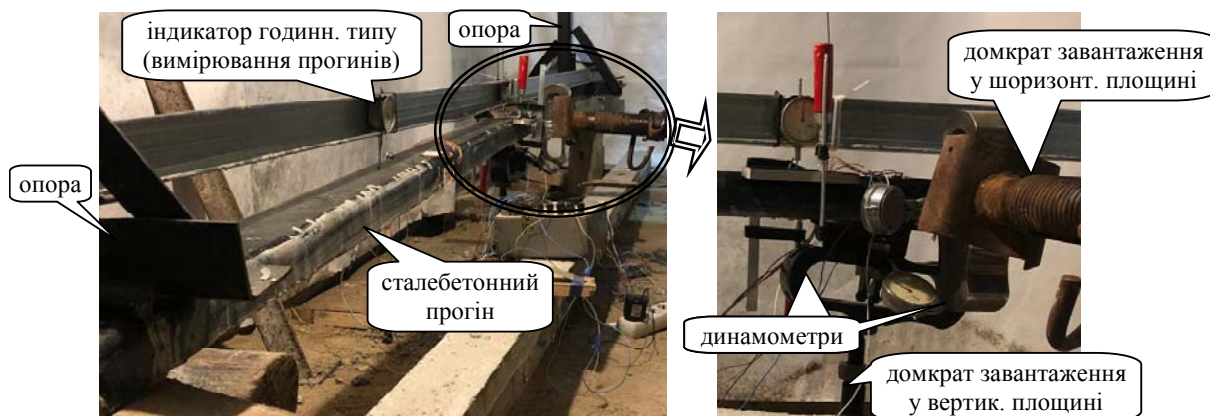


Рисунок 5 – Загальний вигляд сталобетонних прогонів під час проведення випробувань
Джерело: розроблено автором

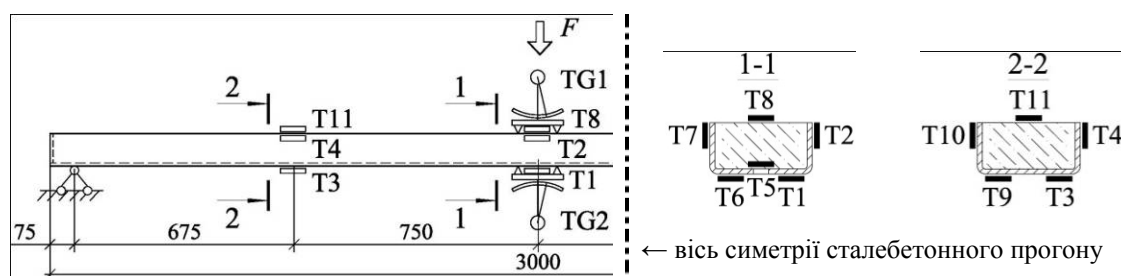


Рисунок 6 – Схема розташування вимірювальних приладів на досліджуваних зразках
Джерело: розроблено автором

Результати експериментальних досліджень попередньо напружених сталобетонних прогонів. На рисунку 7 показано зміни розподілів відносних деформацій нормального перерізу 1-1, розташованого посередині прольоту, сталеві частини досліджених зразків чотирьох груп (рис. 3). Як було зазначено, зразки завантажувалися двома силами посередині прольоту у взаємоперпендикулярних площинах, тому вони працювали в умовах косоного згину. Для наглядного порівняння розвитку відносних деформацій у перерізі 1-1, розподіли відносних деформацій показані по всій площині цього перерізу. Для визначення ефективності

запропонованого попереднього напруження сталеві частини перерізу до її бетонування виконано порівняння розвитку відносних деформацій нормального перерізу та прогинів всіх зразків (рис. 8).

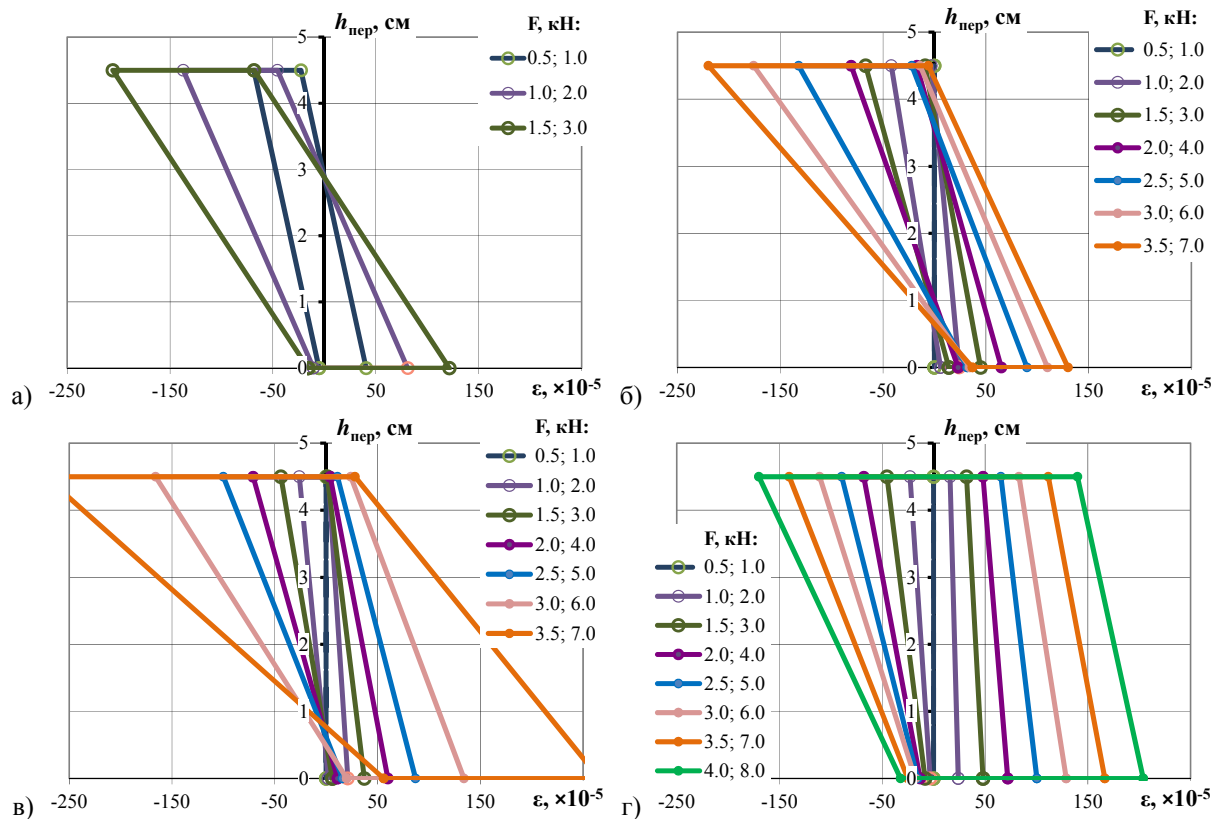


Рисунок 7 – Розподіли відносних деформацій нормального перерізу 1-1 сталобетонних балок:
а) серія С1.3; б) серія СБ1.3; в) серія ПСБ1.3; г) серія ПСБ2.3

Джерело: розроблено автором

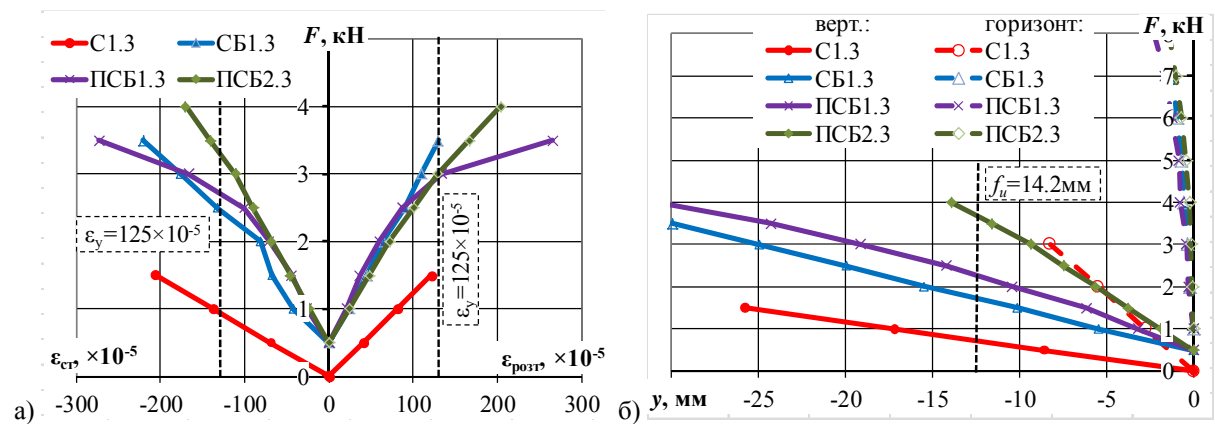


Рисунок 8 – Порівняння розвитку відносних деформацій нормального перерізу сталеві частини (а) та прогинів (б) сталобетонних зразків, завантажених двома силами у взаємоперпендикулярних площинах

Джерело: розроблено автором

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень напружено-деформованого стану та несучої здатності попередньо напружених сталобетонних стінових прогонів, що виготовлені із гнутих швелерів №10 з товщиною стінки 3 мм довжиною 3000 мм із заповненою бетоном U-подібною порожниною та працюють в умовах косою (двовісного) згину, встановлено наступне:

– шляхом заповненням бетоном внутрішньої порожнини сталеві U-подібної частини перерізу можливо фіксувати її попередньо напружений (попередньо вигнутий) стан. Після набору бетоном міцності та відпуску домкрату попередній вигин зменшується на 81% для зразків із заповненням бетоном в рівень з перами швелеру і на 31% для зразків із заповненням бетоном на 30 мм (в 1,6 рази) вище від рівня пера полицок швелера;

– заповнення внутрішньої порожнини швелера бетоном підвищує до 2 раз несучу здатність і жорсткість сталобетонних прогонів, що працюють на косий згин;

– попередній вигин сталеві частини перерізу сталобетонного прогону, що працює на косий згин, підвищує його несучу здатність до 10% та жорсткість до 25%;

– збільшення в 1,6 рази висоти перерізу бетонного осердя попередньо напруженого сталобетонного прогону, що працює на косий згин, підвищує його несучу здатність до 33% та жорсткість до 60%.

Таким чином, експериментально досліджені попередньо напружені сталобетонні прогони, що складаються із гнучого швелеру №10 з товщиною стінки 3 мм заповненого бетоном та працюють на косий згин (при умові, що горизонтальне навантаження вдвічі більше за вертикальне) мають практично таку ж несучу здатність при вищій до 67% жорсткості, як, наприклад, сталевий прогін, виконаний із труби 80×3 мм, що дозволяє зменшити витрати сталі на 38,5%.

Список літератури

1. Бобало Т.В. Порівняння результатів експериментального дослідження сталобетонних балок із комбінованим армуванням з результатами розрахунку за діючими національними нормами. *Архітектура і сільськогосподарське будівництво: Вісник НАУ*. 2012. № 13. С. 34-43.
2. Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф. Вплив параметрів перерізу на несучу здатність сталобетонних конструкцій. *Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр.* 2012. Вип. 3 (33). С. 30-34.
3. Гарькава О.В., Гасенко А.В. Визначення міцності залізобетонних колон при косому стиску. *Наука та будівництво*. 2017. Т.14, № 4. С. 29-35.
4. Гасенко А.В., Новицький О.П., Пенц В.Ф. Реконструкція багатоповерхових промислових будівель під доступне житло із використанням ресурсозберувальних конструктивних рішень. *Зб. наук. пр. Вісник НУВГП, серія Технічні науки*. 2021. № 2 (94). С. 27-40. <https://doi.org/10.31713/vt220214>
5. Дяченко Є.В. Розрахунок міцності косозігнутих залізобетонних елементів з урахуванням повної діаграми фізичного стану бетону: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01 / ПНТУ імені Юрія Кондратюка, Полтава. 2006. 159 с.
6. Кочкаръов, Д. В. (2017). Інженерні методи розрахунку залізобетонних статично невизначених стержневих систем. *УкрДУЗТ : зб. наук. пр.* Вип. 170. С. 98-104.
7. Al-Kaimakchi A., Rambo-Roddenberry M. Structural behavior of concrete girders prestressed and reinforced with stainless steel materials. *Structures*. 2021. Vol. 35(11). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.134>
8. Pavlikov A.M., Harkava O.V., Hasenko A.V., Andriiets K.I. Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. Вип. 77. С. 84-92. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2019-77-84-92>
9. Pavlikov A.M., Mykytenko S.M., Hasenko A.V. Effective structural system for the construction of affordable housing. *International Journal of Engineering & Technology: Publisher of International Academic Journals*. 2018. Vol. 7, № 3.2. Pp.291-298. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14422>
10. Semko O.V., Hasenko A.V., Drobotia O.V., Marchenko D.P. Experimental studies of prestressed steel concrete wall girders. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2022. Vol. 2 (59). Pp. 24-32. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.2876>
11. Wang C., Shen Y., Yang R., Wen Z. Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2017. Pp. 6, 1467940. <https://doi.org/10.1155/2017/1467940>

References

1. Bobalo, T.V. (2012). Porivnyannya rezul'tativ eksperymental'noho doslidzhennya stalebetonnykh balok iz kombinovanykh armuvannyam z rezul'tatamy rozrakhunku za diyuchymy natsional'nymy normamy [Comparison of the results of an experimental study of reinforced concrete beams with combined reinforcement with the results of calculation according to the current national standards]. *Arkhitektura i sil's'kohospodars'ke budivnytstvo: Visnyk NAU – Architecture and agricultural construction: Bulletin of NAU*, 13, 34-43 [in Ukrainian].
2. Vatulya, H.L., Orel, E.F. (2012). Vplyv parametriv pererizu na nesuchu zdattist' stalebetonnykh konstruksiy. *Haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo : zb. nauk. pr. – Influence of cross-section parameters on the load-bearing capacity of reinforced concrete structures. Industrial engineering, construction: coll. of science Ave.*, 3 (33), 30-34 [in Ukrainian].
3. Har'kava, O.V., Hasenko, A.V. (2017). Vyznachennya mitsnosti zalizobetonnykh kolon pry kosomu stysku [Determination of the strength of reinforced concrete columns under oblique compression]. *Nauka ta budivnytstvo - Science and construction*, 4 (14), 29-35 [in Ukrainian].
4. Hasenko, A.V., Novyts'kyy, O.P. & Pents V.F. (2021). Rekonstruktsiya bahatopoverkhovykh promyslovykh budivel' pid dostupne zhytlo iz vykorystannyam resursozberezhuval'nykh konstruktivnykh rishen' [Reconstruction of multi-story industrial buildings for affordable housing using resource-saving structural solutions. Coll. of science Ave]. *Zb. nauk. pr. Visnyk NUVHP, seriya Tekhnichni nauky – Bulletin of the NUVHP, Technical Sciences series*, 2 (94), 27-40. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31713/vt220214>
5. Dyachenko, Ye.V. (2006). Rozrakhunok mitsnosti kosozihnutykh zalizobetonnykh elementiv z urakhuvannyam povnoyi diahramy fizychnoho stanu betonu [Calculation of the strength of obliquely bent reinforced concrete elements taking into account the complete diagram of the physical state of concrete]. *Candidate's thesis. PNTU imeni Yuriya Kondratyuka, Poltava* [in Ukrainian].
6. Kochkar'ov, D.V. (2017). Inzhenerni metody rozrakhunku zalizobetonnykh statychno nevyznachnykh sterzhnevyykh system [Engineering methods of calculating reinforced concrete statically indeterminate rod systems]. *UkrDUZT : zb. nauk. pr. – UkrDUZT: coll. of scient. papers*, 170, 98-104. [in Ukrainian].
7. Al-Kaimakchi, A. & Rambo-Roddenberry, M. (2021). Structural behavior of concrete girders prestressed and reinforced with stainless steel materials. *Structures*, 35(11) [in English].
8. Pavlikov, A.M., Harkava, O.V., Hasenko, A.V. & Andriets, K.I. (2019). Comparative analysis of numerical simulation results of work of biaxially bended reinforced concrete beams with experimental data. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 77, 84-92 [in English].
9. Pavlikov, A.M., Mykytenko, S.M. & Hasenko, A.V. (2018). Effective structural system for the construction of affordable housing. *International Journal of Engineering & Technology: Publisher of International Academic Journals*. 7, 3.2, 291-298. [in English]. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14422>
10. Semko, O.V., Hasenko, A.V., Drobotia, O.V., Marchenko, D.P. (2022). Experimental studies of prestressed steel concrete wall girders. *Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2 (59), 24-32. [in English]. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.2876>
11. Wang, C., Shen, Y., Yang, R. & Wen, Z. (2017). Ductility and Ultimate Capacity of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 6, 1467940 [in English]. <https://doi.org/10.1155/2017/1467940>

Olexander Drobotia, graduate student

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

Experimental Tests of Prestressed Load-Bearing Elements of Fencing Structures Made of Cold-Formed Steel Profiles for Oblique Bending

Wall purlins serve as load-bearing elements of the light external wall girders of buildings. Structurally, such wall girders are horizontal beam elements. The external load on the wall girders is the vertical load from the own weight of the wall enclosure and the horizontal wind load. Thus, wall girders work for bending in two planes or the so-called oblique bending. The wide application of elements operating in conditions of oblique bending requires a comprehensive theoretical and experimental study of their operation. The load from the own weight of the wall enclosure, made of light sandwich panels, is approximately equal to the wind load on the territory of Ukraine. Therefore, in this case, the wall girders are designed with equal strength in two planes.

To find out the real operation of obliquely bent elements, it is necessary to determine all the parameters that can affect the picture of the destruction of such elements. The purpose of the work is to study experimentally the possibility of applying pre-stressing in one plane of reinforced concrete girders with reduced metal capacity in this plane. The subject of the study is the stress-strain state and bearing capacity of a reinforced concrete rod prestressed in this way. The investigated steel-concrete girders were made of bent channel No. 10 with a wall

thickness of 3 mm, the inner cavity of which was filled with concrete of class C20/25. Before concreting the inner cavity, a preliminary bending of the steel profile opposite to the operational one was carried out.

The magnitude of the previous bending of the steel profile compensated for its reduced geometric characteristics in this plane. The use of a pre-stressed trough-shaped steel profile in the form of a bent channel No. 10 with a wall thickness of 3 mm for a wall run, followed by its concreting, allows you to reduce steel consumption by up to 38,5% compared to, for example, the use of an 80×3 mm pipe of the same bearing capacity for a run.

wall girders, reinforced concrete, pre-stressing, experimental tests, oblique bending

Одержано (Received) 11.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 19.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 629.33: 656.132

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.213-221](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.213-221)**В. Г. Загорянський**, доц., д-р техн. наук*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м. Кременчук, Україна**e-mail: zagor_vlad@ukr.net*

Ергономічне забезпечення вимог до комфортності поїздки в міському автобусі великої місткості

Забезпечення комфортності пасажирських перевезень у міському автобусі визначається дотриманням ергономічних вимог, що, в свою чергу, залежить від конструктивних особливостей облаштування площі, призначеної для пасажирів. Розглянуті ці питання стосовно до міських автобусів місткістю більше двадцяти двох пасажирів. Проаналізовані поняття місткості пасажирського автобуса, його комфортності, розглянуті ергономічні вимоги до параметрів комфортності автобусів, визначені основні чинники, які визначають комфортність автобусів великої місткості.

пасажирів, перевезення, місто, автобус, ергономіка, комфортність, місткість, вимоги, конструкція

Постановка проблеми. Відомо [1], що наприкінці минулого десятиріччя перевезення пасажирів між видами міського транспорту в Києві розподілялися так: автобус – 42,0 %, таксі, відомчий та приватний транспорт – 29,0 %, тролейбус – 12,8 %, трамвай – 10,2 %, метрополітен – 6,0 %.

Послуги пасажирського автомобільного транспорту поділяють на послуги з перевезення пасажирів автобусами, на таксі та легковими автомобілями на замовлення [2].

Відповідно до Закону України Про автомобільний транспорт [2], а також ДСТУ 2984-95. Засоби транспортні дорожні. Типи. Терміни та визначення, автобус – транспортний засіб, який за своєю конструкцією та обладнанням призначений для перевезення пасажирів з кількістю місць для сидіння більше ніж дев'ять з місцем водія включно.

Існують такі види режимів організації перевезень при наданні послуг з перевезення пасажирів автобусами – регулярні, регулярні спеціальні, нерегулярні. В першому режимі перевезення здійснюють автомобільні перевізники на автобусних маршрутах загального користування, на умовах договорів органами виконавчої влади та органами місцевого самоврядування.

Автобус для міст із населенням до 250 тис. жителів є основним, а в деяких містах – єдиним видом транспорту [1]. Автобусне обслуговування є практично у всіх містах і населених пунктах України. Автобус – це також основний засіб зв'язку між містом і селом. На його частку припадає основний обсяг роботи з освоєння пасажиропотоків у приміських зонах. Автобус є найбільш простим, широко розповсюдженим і маневреним видом наземного транспорту.

Завдяки своїй маневреності та можливості організації екстрених перевезень зі зміною маршруту автобус використовується у випадку поломок рейкового електричного транспорту, тому багато міст світу експлуатують два види міського транспорту – метрополітен і автобус.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблем ергономічного забезпечення транспортних процесів на автомобільному транспорті, зокрема комфортності пасажирських автобусних перевезень присвячені роботи Бондарєва С. І. [3], Босняка М. Г. [4], Вдовиченка В. О. [5], Гаврилова Е. В. [6], Горбачова П. Ф., Гюлева Н. У. [7], Давідіча Ю. О. [8, 9], Дмитриченко М. Ф. [6], Долі В. К. [10], Ігнатенко О. С., Куша Є. І. [9], Понкратова Д. П. [9], Вукана Р. Вучика та ін.

Складність проблеми, вплив великої кількості чинників, розбіжності в трактування деяких положень є підставою для того, що питання ергономічного забезпечення параметрів комфортності автобуса при перевезенні пасажирів автобусами великої місткості залишаються недостатньо опрацьованими.

Аналіз результатів теоретико-прикладних досліджень, присвячених питанню ергономічного забезпечення параметрів комфортності міського пасажирського автобуса, показав, що вони не повною мірою відповідають сьогodнішнім викликам функціонування ринку пасажирських перевезень на сучасному етапі розвитку економіки. Так, при розгляді оптимізації системи «водій-автомобіль-дорожнє середовище» [6], на жаль, розгляд обмежений лише аспектом обладнання кабіни автомобіля.

Постановка (мета) завдання. Відповідно до Закону України Про автомобільний транспорт [2], параметри комфортності автобуса – це конструктивні параметри автобуса, які визначають для пасажирів комфортність поїздки.

В роботі в цьому аспекті будемо розглядати автобуси місткістю понад 22 пасажирів, крім водія (так звані «автобуси великої місткості» (Правило Європейської Економічної Комісії ООН № 36).

Метою даної роботи є аналіз основних чинників, що визначають параметри комфортності автобуса при перевезенні пасажирів автобусами великої місткості.

Виклад основного матеріалу. Зупинимось дещо на питанні визначення місткості автобуса великої місткості.

Відповідно до класифікації автобусів за конструкцією [11], яка ґрунтується на положеннях Женевської Угоди 1958 року (Угода про прийняття єдиних технічних приписів для колісних транспортних засобів, предметів обладнання та частин, які можуть бути встановлені та/або використані на колісних транспортних засобах, і про умови взаємного визнання офіційних затверджень, виданих на основі цих приписів) та Правил ЄЕК ООН, що до неї додаються, автобуси місткістю не більше 22 пасажирів, крім водія, поділяються на два класи:

– клас А: автобуси, призначені для перевезення сидячих пасажирів та мають місця для стоячих пасажирів;

– клас В: автобуси, призначені для перевезення виключно сидячих пасажирів.

Автобуси місткістю понад 22 пасажирів, крім водія, поділяються на три класи:

– клас І: автобуси, призначені для перевезення сидячих і стоячих пасажирів, конструкція яких дає змогу пасажирам безперешкодно переміщуватись по салону;

– клас ІІ: автобуси, призначені для перевезення головним чином сидячих пасажирів, а також стоячих пасажирів у проході проміж рядами та (або) на площадці для стоячих пасажирів, розмір якої не перевищує $1,5 \text{ м}^2$;

– клас ІІІ: автобуси, призначені для перевезення виключно сидячих пасажирів.

Відмітимо, що в стандарті ГСТУ Засоби транспортні дорожні. Технічні вимоги до безпеки конструкції автобусів загального призначення, які знаходяться в експлуатації [12] (поширюється на автобуси місткістю не більше 22 сидячих і стоячих пасажирів, крім водія, які знаходяться в експлуатації і використовуються як автобуси

загального призначення на маршрутах загального користування) автобуси загального призначення поділяються на три класи:

– клас А: автобус місткістю від 9 до 22 пасажирів включно, обладнаний місцями для сидіння та може мати місця для стоячих пасажирів.

– клас В: автобус місткістю від 9 до 22 сидячих пасажирів включно і без місць для стоячих пасажирів.

– клас С: автобус з повною конструктивною масою не більше 3,5 т та пасажировмісткістю від 9 до 12 сидячих пасажирів включно і без місць для стоячих пасажирів.

Автобуси, відповідно до стандартів, що діяли раніше (ГОСТ 27815-88 (Правила ЕЭК ООН N 36) Автобусы. Общие требования к безопасности конструкции), можуть бути «великої» та «малої» місткості.

Автобуси «великої» місткості, тобто транспортні засоби для перевезення людей, місткістю понад 22 пасажирів, що стоять або сидять, мають габаритну ширину більше 2,3 м, поділялися на три класи: I – міські автобуси; II – міжміські автобуси; III – автобуси далекого прямування.

Транспортні засоби загального користування «малої» місткості (менше 22 пасажирів, крім водія), називалися «автобусами малої місткості».

Раціональна номінальна місткість автобусу, виходячи з доцільного інтервалу руху у годину «пік», пасажирів:

$$q_n = \frac{N_{\max} \cdot I_{\text{доц}}}{60}, \quad (1)$$

де N_{\max} – пасажиропотік на найбільш завантаженому перегоні маршруту в прямому або в зворотному напрямку, в годинному інтервалі, пасажирів;

$I_{\text{доц}}$ – доцільний інтервалу руху у годину «пік» (для приміських маршрутів – 10-15 хвилин, для міжміських маршрутів в залежності від відстані – 15–60 хвилин).

Інтервал руху автобусів у годину «пік», хвилин:

$$I_{\text{пік}} = \text{int} \left(\frac{60q_{\text{гран}}}{N_{\max}} \right) + 1, \quad (2)$$

де $q_{\text{гран}}$ – гранична (максимальна пікова) місткість автобуса (визначається числом місць для сидіння і стояння пасажирів з розрахунку, що коефіцієнт заповнення площі $\alpha = 8$ пасажирів на 1 м^2 вільній площі полу), пасажирів:

$$q_{\text{гран}} = 8 \cdot \left(\frac{q_n - q_{\text{сид}}}{5} \right) + q_{\text{сид}}, \quad (3)$$

де $q_{\text{сид}}$ – кількість місць для сидіння.

Класифікація транспортних засобів відповідно до їх довжини наведена в табл. 1 [13].

Таблиця 1 – Класифікація транспортних засобів за місткістю

Найменування типу місткості	Розрахункова місткість, пас./трансп. засіб	Довжина засобу, м
Особливо мала	10-16 ≈ (16)	≤ 5,5
Мала	45-50 ≈ (50)	≤ 7,5
Середня	60-65 ≈ (70)	≤ 9,5
Велика	70-98 ≈ (100)	≤ 11
Особливо велика	100 і більше (>>100)	≥ 12

Джерело: [13]

За видами сполучень автобусні маршрути поділяються на міські, приміські, міжміські, міжнародні, за видами перевезень – на маршрути загального користування, спеціальних перевезень, нерегулярних перевезень [2].

На міських та приміських автобусних маршрутах дозволяється перевозити стоячих пасажирів, якщо конструкцією передбачені місця для стоячих пасажирів, у кількості, передбаченій технічною характеристикою автобусу та визначеній у реєстраційних документах на нього. На міжміських і міжнародних автобусних маршрутах дозволяється перевозити пасажирів з обов'язковим наданням їм місць для сидіння.

Використання автобусів за видами сполучення та протяжністю маршрутів залежно від їхнього класу та категорії здійснюють, враховуючи особливості конструкції автобусів з огляду на безпечність та комфортність перевезення пасажирів та багажу і забезпечення належних умов поїздки (табл. 2) [11].

Таблиця 2 – Використання автобусів за видами сполучень

Клас автобуса	Маршрути за видами сполучень та протяжністю маршрутів				
	міські	приміські	міжміські		міжнародні
			протяжністю до 150 км	протяжністю понад 150 км	
I					
II					
III					

Джерело: [11]

На автобусному маршруті загального користування перевезення пасажирів може здійснюватися у режимах [2]:

– у звичайному режимі руху – це перевезення пасажирів автобусами на маршруті загального користування з дотриманням усіх зупинок, передбачених розкладом руху;

– в експресному режимі руху – це перевезення пасажирів автобусами на маршруті загального користування, на якому є звичайний режим руху, з дотриманням зупинок, кількість яких за розкладом руху не перевищує 25% кількості зупинок при звичайному режимі руху;

– у режимі маршрутного таксі – це перевезення пасажирів на міському чи приміському автобусному маршруті загального користування за розкладом руху, в якому визначається час відправлення автобусів з початкового та кінцевого пунктів маршруту з висадкою і посадкою пасажирів чи громадян на їхню вимогу на шляху прямування автобуса в місцях, де це не заборонено правилами дорожнього руху.

При звичайному режимі припускається, що рухомий склад зупиняється на всіх зупинках маршруту, при експресному режимі руху – транспортні засоби зупиняються на деяких зупинках маршруту, при режимі маршрутного таксі – відбувається рух із зупинками, які не визначені паспортом маршруту, за винятком кінцевих, а виконувані за бажанням пасажирів і обов'язковою вимогою: у транспортному засобі повинні використовуватися тільки міста для сидіння [14].

Для автобусів, які можуть застосовуватися на міських маршрутах, режими руху, визначаються, враховуючі можливості створення максимально сприятливих умов для пасажирів, забезпечення виконання затвердженого розкладу руху, нестворення перешкод для руху інших транспортних засобів (табл. 3) [11].

Таблиця 3 – Режими руху автобусів, які можуть застосовуватися на міських маршрутах

Клас автобуса	Дозволений режим руху
I	Звичайний
II	Звичайний, Експресний
III	Звичайний, Експресний

Джерело: [11]

Вимоги до параметрів комфортності автобусів, процедуру визначення їх класу комфортності та сферу їхнього використання за видами сполучень та режимами руху установлює Порядок визначення класу комфортності автобусів, сфери їхнього використання за видами сполучень та режимами руху [11]. Цей же Наказ класифікує автобуси за чотирма класами згідно з вимогами до комфортності автобусів. Класи позначаються символом * (зірка). Кількість зірок збільшується відповідно до підвищення класу комфортності автобусів. Вищий клас позначають – ****, нижчий – *.

Компоновка салону автобуса має враховувати його тип (призначення), пасажиромісткість та розміри сидінь, а також рух пасажирів у ньому під час посадки-висадки. Деякі з можливих схем компоновки салону автобуса наведені на рис. 1.

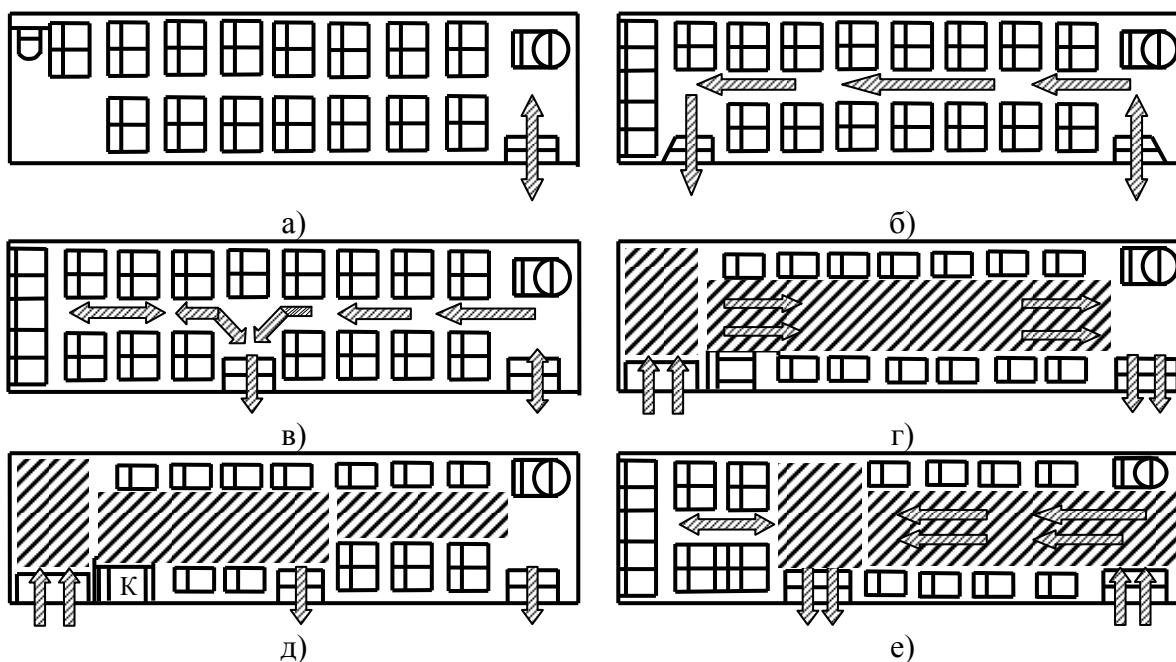


Рисунок 1 – Приклади можливих схем компоновки салонів автобусів великої місткості:

а) III класу; б, в) II класу; г, д, е) I класу

Джерело: [11]

У автобусах I класу передбачаються місця для пасажирів, що стоять, і вживаються заходи для їх безперешкодного переміщення. Автобуси II класу використовуються в основному для перевезення пасажирів, що сидять, але допускається і перевезення пасажирів, що стоять, у проході та/або в спеціальному місці. Автобуси III класу автобуси використовуються виключно для перевезення пасажирів, що сидять, вони забезпечуються комфортабельними сидіннями, туалетом, баром або буфетом.

Вважається, що пасажир автобуса I класу має масу 68 кг, а автобуса II і III класів – 71 кг (включаючи 3 кг ручної поклажі), пасажир автобуса I класу, що стоїть, займає площу 0,125 м², а автобуса II класу – 0,15 м².

Автобуси повинні мати певну кількість дверей. Розрізняють службові двері (вони використовуються пасажиром при нормальній експлуатації) та запасні двері (вони влаштовуються додатково до службових дверей та використовуються у виняткових обставинах, за небезпеки). Крім того, передбачаються аварійні виходи (вікна, люки).

Мінімальна кількість службових дверей залежить від кількості пасажирських місць та класу автобуса, вона регламентована стандартом. Загальна кількість дверей – не менше двох. Загальна кількість виходів, включно з аварійними, також визначається стандартом.

Ширина одинарних службових дверей – не менше 65 см, здвоєних – не менше 120 см, інші розміри виходів вказані в стандарті.

Через вільний простір усередині транспортного засобу біля бічної стінки, в якій розташовані службові двері, повинен вільно проходити у вертикальному положенні спеціальний щит, розмір якого визначається стандартом.

Певний простір пасажирського салону зайнятий сходами біля службових та аварійних дверей. Розміри сходів за висотою, глибиною та шириною задаються стандартом.

Пасажирські сидіння в автобусі можуть бути індивідуальними або безпосередньо примикати по ширині один до одного.

Ескізи пасажирських сидінь (відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03:2005 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження пасажирських колісних транспортних засобів великої місткості стосовно загальної конструкції (UN/ECE R 36-03:2002, IDT)) показано на рис. 2.

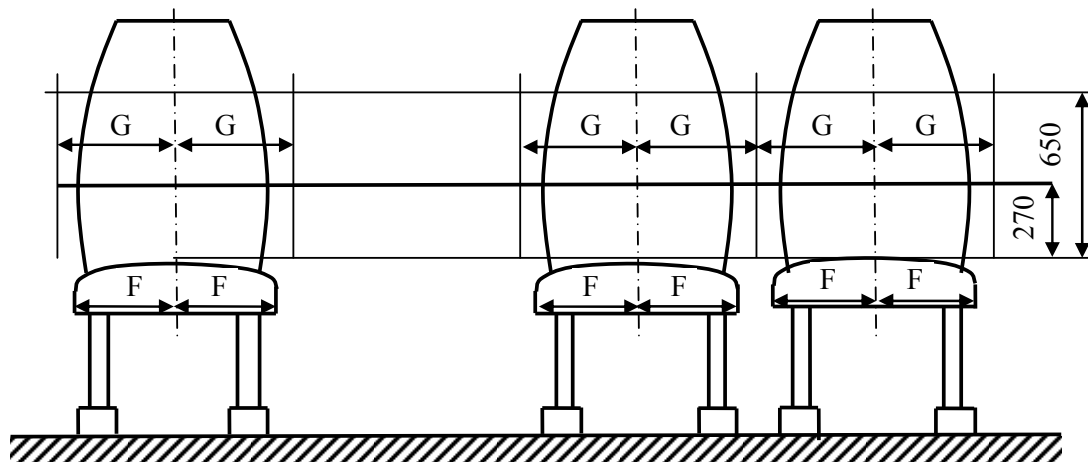


Рисунок 2 – Розміри, мм, що визначають ширину пасажирських сидінь автобусів: зліва – індивідуальне (одномісне) сидіння, справа – суцільне (двох і багатомісне сидіння)

Джерело: розроблено відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03:2005

Мінімальний розмір G при суцільному сидінні дорівнює 225 мм для всіх класів автобусів, для індивідуального сидіння – 250 мм, також для всіх класів автобусів. Розмір F , що характеризує ширину подушки сидіння, для I та II класів автобусів дорівнює 200 мм, для класу III – 225 мм.

Важливе значення мають поздовжні розміри, що визначають розміри сидінь і крок їх розташування вздовж салону. Значною мірою ці параметри задають розміри салону або, за незмінної його довжини, зумовлюють пасажиромісткість автобуса. Відстань між сидіннями та висота подушки сидіння (відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03:2005) показані на рис. 3.

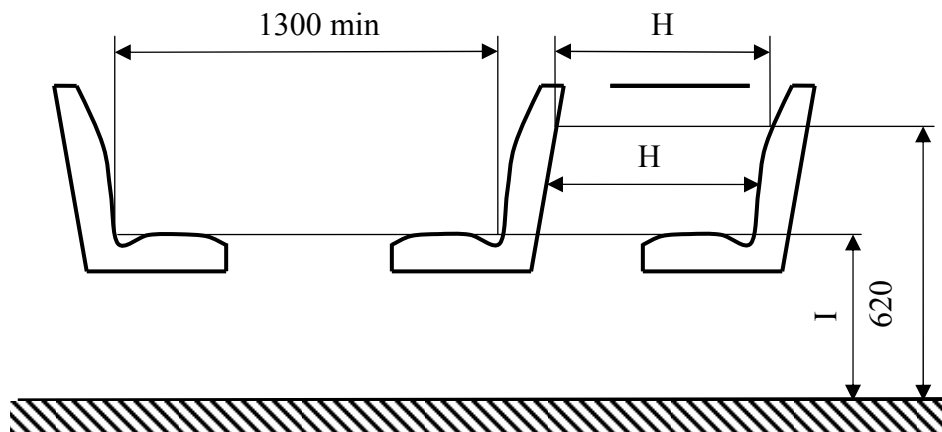


Рисунок 3 – Відстань, мм, між сидіннями та висота подушки сидіння

Джерело: розроблено відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03:2005

Зазвичай намагаються розташувати сидіння в такий спосіб, щоб пасажир розміщувався обличчям у напрямку руху. Однак для міських автобусів, в районі розташування колісних кожухів і в передній частині салону, вдається розмістити додаткові сидіння ціною розташування деяких з них обличчям назад. Це пояснюється тим, що підлога міського автобуса прагнуть зробити можливо нижче, і тоді колісні кожухи задніх коліс виступають над підлогою та заважають помістити сидіння. Мінімально допустимі розміри, що визначають положення сидінь за довжиною (відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03:2005), наведено у табл. 4.

Таблиця 4 – Поздовжні розміри, що визначають положення пасажирських сидінь автобуса, мм

Клас автобуса	H, не менше	I, не менше
I	650	400...500 (350 над колісними кожухами та моторним відділенням)
II	680	
III	750	

Джерело: розроблено відповідно до ДСТУ UN/ECE R 36-03:2005

Глибина подушки сидіння має бути не менше 350 мм для автобусів класу I та 400 мм для автобусів класів II та III.

Поперечний переріз автобусного кузова часто буває не прямокутним, а дещо звуженим у верхній частині. У зв'язку з цим бічні стінки виходять не вертикальними і звужують вгору внутрішній простір салону. У нижній частині, біля підлоги, проходять різні трубопроводи, і їх кожухи також виступають всередину салону. Допустимі розміри цих виступів також обумовлюються стандартом.

Розташування поручнів для пасажирів, що стоять, обумовлене стандартом, перевіряється спеціальним випробувальним пристроєм. Крім поручнів і опор для рук пасажирів, що стоять, передбачаються також поручні біля службових дверей.

Висновки:

1. До чинників, які визначають комфортність автобусів великої місткості, відносяться конструкція та розташування сидінь, клімат-контроль (що працює при роботі двигуна), обігрів (що працює при роботі двигуна), вікна (тонування скла, протисонячне обладнання (штори або занавіски), індивідуальне освітлення, мікрофон

та гучномовець, багажне відділення, санітарне обладнання (туалети з водяним чи хімічним очищенням, умивальники), холодильник, кафе-бар, телевізор у салоні, а також підвіска (класична (механічна) або пневматична/пневмомеханічна).

2. Розробка інтер'єру пасажирського салону автомобіля, в тому числі, автобуса передбачає визначення геометричних параметрів приміщення, в якому розташовуються люди, розташування в транспортному засобі досить зручних сидінь та виконання обробки внутрішніх поверхонь. Конструктор, що займається компонованням внутрішнього простору автомобіля, вирішує складне та суперечливе завдання – з одного боку, є прагнення до зменшення цього простору, тому що тоді буде потрібно менше матеріалів для виготовлення машини, об'єкт, що розробляється, стане легше і дешевше, а з іншого боку, пасажири мають бути забезпечені достатнім рівнем комфорту, передусім зручним становищем користування нею як пасажира.

Список літератури

1. Соловійова О. О., Висоцька І. І., Герасименко І. М. Загальний курс транспорту. Київ: НАУ, 2019. 244 с.
2. Про автомобільний транспорт: Закон України від 05.04.2001 р. № 2344-III. Дата оновлення: 19.06.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> (дата звернення: 30.04.2023).
3. Бондарев С. І., Бондарева Л. М. Пасажирські перевезення (на автомобільному транспорті). Київ: Компринт, 2017. 525 с.
4. Босняк М. Г. Пасажирські автомобільні перевезення. Київ: Видавничий Дім «Слово», 2009. 272 с.
5. Вдовиченко В. О., Потаман Н. В. Пасажирські автомобільні перевезення. Харків: ХНАДУ, 2017. 335 с.
6. Системологія на транспорті. Підручник у 5 кн. ; під заг. ред. М.Ф. Дмитриченка. Кн. 5: Ергономіка / Е. В. Гаврилов та ін. Київ: Знання України, 2008. 256 с.
7. Гюлев Н. У. Особливості ергономіки і психофізіології в діяльності водія. Харків: ХНАМГ, 2012. 185 с.
8. Давідіч Ю. О. Проектування автотранспортних технологічних процесів з урахуванням психофізіології водія. Харків: ХНАДУ, 2006. 292 с.
9. Давідіч Ю. О., Куш Є. І., Понкратов Д. П. Ергономічне забезпечення транспортних процесів. Харків: ХНАМГ, 2011. 391 с.
10. Доля В. К. Пасажирські перевезення. Харків: Форт, 2011. 504 с.
11. Про затвердження Порядку визначення класу комфортності автобусів, сфери їхнього використання за видами сполучень та режимами руху: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України № 285 від 12.04.2007 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0499-07#Text> (дата звернення: 08.05.2023).
12. Про затвердження ГСТУ «Засоби транспортні дорожні. Технічні вимоги до безпеки конструкції автобусів загального призначення, які знаходяться в експлуатації»: Наказ Міністерства транспорту України № 807 від 21.11.2001 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0807361-01#Text> (дата звернення: 08.05.2023).
13. Марченко Д. Д., Артюх В.О. Експлуатаційні властивості транспортних засобів. Миколаїв: МНАУ, 2015. 88 с.
14. Біліченко В. В. Захарчук Т. В. Аналіз методів визначення режимів руху автобусів на міських маршрутах. *XLV науково-технічна конференція факультету машинобудування та транспорту ВНТУ*: матеріали (Винниця, 23–24 березня 2016 р.). Винниця: ВНТУ, 2016. С. 1–2.

References

1. Solovyov, O.O., Vysots'ka, I.I. & Herasymenko, I.M. (2019). *Zahal'nyy kurs transportu [General course of transport]*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
2. Pro avtomobil'nyy transport: Zakon Ukrainy [About road transport: Law of Ukraine] vid 05.04.2001 r. № 2344-III. Data onovlennya: 19.06.2022. [zakon.rada.gov.ua](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text> [in Ukrainian].
3. Bondaryev, S.I., Bondaryeva, L.M. (2017). *Pasazhyrs'ki perevezennya (na avtomobil'nomu transporti) [Passenger transportation (by road)]*. Kyiv: Komprint [in Ukrainian].
4. Bosnyak, M. H. (2009). *Pasazhyrs'ki avtomobil'ni perevezennya [Passenger automobile transportation]*. Kyiv: Vydavnychy Dim «Slovo» [in Ukrainian].

5. Vdovychenko, V.O. & Potaman, N.V. (2017). *Pasazhyrs'ki avtomobil'ni perevezennya* [Passenger automobile transportation]. Kharkiv: KHNADU [in Ukrainian].
6. Havrylov, E.V. et al. (2008). *Systemolohiya na transporti*. M.F. Dmytrychenka (Eds.). (Vols. 1-5; Vol.5) *Erhonomika* [Ergonomics]. Kyiv: Znannya Ukrainy [in Ukrainian].
7. Hyulyev, N.U. (2012). *Osoblyvosti erhonomiky i psykhoфизиології v diyal'nosti vodiya* [Peculiarities of ergonomics and psychophysiology in the driver's activity]. Kharkiv: KhNAMH [in Ukrainian].
8. Davidich, Yu.O. (2006). *Proektuvannya avtotransportnykh tekhnolohichnykh protsesiv z urakhuvannyam psykhoфизиології vodiya* [Designing motor vehicle technological processes taking into account the psychophysiology of the driver]. Kharkiv: KhNADU [in Ukrainian].
9. Davidich, Yu.O., Kush, Ye.I. & Ponkratov, D.P. (2011). *Erhonomichne zabezpechennya transportnykh protsesiv* [Ergonomic support of transport processes]. Kharkiv: KhNAMH [in Ukrainian].
10. Dolya, V.K. (2011). *Pasazhyrs'ki perevezennya* [Passenger transportation]. Kharkiv: Fort [in Ukrainian].
11. Pro zatverdzhennya Poryadku vyznachennya klasu komfortnosti avtobusiv, sfery yikhnoho vykorystannya za vydamy spoluchen' ta rezhymamy rukhu: Nakaz Ministerstva transportu ta zv'yazku Ukrainy [On the approval of the Procedure for determining the comfort class of buses, the scope of their use by types of connections and traffic modes: Order of the Ministry of Transport and Communications of Ukraine] № 285 vid 12.04.2007 r. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0499-07#Text> [in Ukrainian].
12. Pro zatverdzhennya HSTU «Zasoby transportni dorozhni. Tekhnichni vymohy do bezpeky konstruktivnoy avtobusiv zahal'noho pryznachennya, yaki znakhodyat'sya v ekspluatatsiyi»: Nakaz Ministerstva transportu Ukrainy [On the approval of GSTU «Road vehicles. Technical requirements for the safety of the construction of general-purpose buses in operation»: Order of the Ministry of Transport of Ukraine] № 807 vid 21.11.2001 r. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0807361-01#Text> [in Ukrainian].
13. Marchenko, D.D. & Artyukh, V.O. (2015). *Ekspluatatsiyni vlastyvoli transportnykh zasobiv* [Operating properties of vehicles]. Mykolayiv: MNAU [in Ukrainian].
14. Bilichenko, V.V. & Zakharchuk, T.V. (2016). *Analiz metodiv vyznachennya rezhymiv rukhu avtobusiv na mis'kykh marshrutakh* [Analysis of methods of determining bus traffic modes on city routes]. *XLV naukovo-tekhnichna konferentsiya fakul'tetu mashynobuduvannya ta transportu VNTU: materialy* (Vynnytsya, 23–24 bereznya 2016 r.). Vynnytsya: VNTU. Pp. 1–2. [in Ukrainian].

Volodymyr Zahorianskyi, Assoc. Prof., DSc.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

Ergonomic Provision of Requirements for the Comfort of a Trip in a Large-capacity City Bus

The purpose of the paper is to analyze the main factors that determine the parameters of bus comfort when transporting passengers by large-capacity buses.

Ensuring the comfort of passenger transportation in a city bus is determined by compliance with ergonomic requirements, which, in turn, depends on the design features of the space intended for passengers. The paper examines these questions in relation to single-deck single and articulated public buses with a capacity of more than twenty-two passengers, standing or sitting, except for the driver. From the point of view of the Ukrainian legislation and regulatory framework, the concepts of the capacity of a passenger bus, its comfort, the main factors that determine the comfort of large-capacity buses are analyzed. The scope of use of buses of different classes and categories according to the types of connections and the length of the routes is determined taking into account the features of the design of the buses regarding the comfort and safety of the transportation of passengers and luggage and ensuring proper travel conditions. The ergonomic requirements for the comfort parameters of buses, the procedure for determining their comfort class and the scope of their use by types of connections and traffic modes are also considered.

It was found that the factors that determine the comfort of large-capacity buses include the design and location of the seats, climate control (operating while the engine is running), heating (operating while the engine is running), windows (glass tinting, sun protection equipment (curtains or curtains), individual lighting, a microphone and loudspeaker, the presence of a luggage compartment, the presence of sanitary equipment (toilets with water or chemical cleaning, wash basins), the presence of such amenities as a refrigerator, cafe bar, TV in the cabin, as well as the type of suspension (classic (mechanical) or pneumatic/ pneumomechanical).

passengers, transportation, city, bus, ergonomics, comfort, requirements

Одержано (Received) 16.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 22.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.222-230](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.222-230)

А. Г. Кравцов, доц., канд. техн. наук, **Т. Ф. Ларіна**, проф., докт. екон. наук,
О. М. Горяїнов, доц., канд. техн. наук, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук,
Т.Е. Городецька, доц., канд. екон. наук, **І.А. Бабич**, ст. викл.

Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

e-mail: kravcov_84@ukr.net

Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі

У роботі отримано критерій оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках вулично-дорожньої мережі. Аналіз критерію дозволяє сформулювати параметри, від яких залежить стійкість. Показано, що на стійкість транспортного потоку впливають щільність та інтенсивність транспортного потоку. Їх необхідно розраховувати для кожної ділянки дорожньої мережі чи магістралі як коефіцієнти підсилення. Дано визначення робастності транспортного потоку (англ. robust range) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон сталого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. Показано, що розроблений критерій робастності необхідно застосовувати при аналізі дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

транспортний потік, моделювання, динамічна модель, градієнт щільності, градієнт швидкості, коефіцієнт підсилення, постійна часу, критерій стійкості, критерій робастності транспортного потоку

Постановка проблеми. В даний час транспортний потік та затори на дорожній мережі великих міст є однією з основних соціальних, економічних та екологічних проблем, пов'язаних із автомобільним транспортом у промислово розвинених країнах. Тому, управління транспортними потоками на перевантажених дорожніх мережах вимагає чіткого розуміння того, що викликає перевантаження доріг, що визначає час і місце виникнення заторів, як перевантаження поширюється по дорожній мережі тощо. З цією метою за останні п'ятдесят років було розроблено широкий спектр теорій та моделей транспортних потоків, щоб відповісти на ці дослідницькі питання. Застосування моделювання транспортних процесів є найбільш економічним методом дослідження, що одночасно дозволяє з достатньою достовірністю прогнозувати затримки під час руху та утворення заторів. Різноманітність різних варіантів організації дорожнього руху обумовлює використання цілого набору критеріїв, за допомогою яких можна моделювати та прогнозувати стійкість транспортних потоків та умови появи заторів.

Ця робота є продовженням роботи [1], де обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Математична модель враховує динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків враховуються динамічні властивості транспортних засобів та багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальним рівнянням третього порядку.

Продовженням досліджень, які наведено в роботі [1], є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі та прогнозування запасу стійкості при дії зовнішніх збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами роботи [2] наголошується, що існує кілька стратегій, що дозволяють зменшити затори, зробити міста придатними для життя, чистими та безпечними, а також обмежити збільшення часу транспортних засобів у дорозі. У роботі робиться висновок, що для вирішення таких завдань важливо знати, як насправді виглядатиме транспортний потік, де і коли будуть затори, де існують вузькі місця та де низька пропускна спроможність доріг. На думку авторів моделі транспортних потоків дозволяють виконувати таку оцінку, моделюючи та прогножуючи рух на дорогах. Використовуючи такі моделі можна прогнозувати затори на дорогах та час транспортних засобів у дорозі.

У роботі [3] наведено огляд приблизно п'ятдесятирічного досвіду моделювання транспортних потоків. Автори аналізують та порівнюють широкий спектр підходів до моделювання, розроблених до теперішнього часу та використовуваних сьогодні. Розглянуті моделі класифікуються за рівнем деталізації, з якою описується транспортний потік. Для кожної з категорій обговорюються такі питання, як точність моделювання, застосовність, а також калібрування та перевірка моделі.

Для вирішення проблеми заторів на певній ділянці доріг у роботі [4] розроблено набір систем прийняття рішень щодо оптимізації транспортного потоку. Для аналізу фактичних умов руху та розрахунку щільності та швидкості руху авторами створюється модель прогнозування транспортного потоку, яка ітеративно оновлюється, шляхом зміни вхідних параметрів. На основі цієї моделі оцінюється ступінь завантаженості на ділянці дороги, у зв'язку з чим пропонуються методи інтелектуального прийняття рішень та узгодженої оптимізації. Крім того, у цій статті реалізовано деякі прикладні експерименти на досліджуваній дорозі з трьома перехрестями та отримано гарні результати прогнозування щільності та швидкості руху. У той же час, у порівнянні з іншими існуючими методами прогнозування транспортного потоку, модель, яка представлена в цій статті, має більш високу точність, більш короткий час прогнозування та сильніший захист від перешкод.

Деякі важливі аспекти моделювання стійкості транспортних потоків представлені у роботах [5, 6]. Авторами розроблено набір критеріїв порівняльного аналізу, починаючи від експлуатаційних показників (наприклад, затримки та часу в дорозі) і закінчуючи складними явищами потоку - коливаннями, падінням пропускної спроможності та явищем гістерезису. З аналізу робіт [5, 6] можна зробити висновок про важливість обліку коливання параметрів, які характеризують транспортний потік, в математичних моделях. Такий підхід дозволить підвищити точність моделювання та прогнозування транспортного обслуговування. Реєструючи параметри транспортного потоку, такі як щільність, інтенсивність, час затримок, за допомогою спеціальних датчиків, як показано в роботі [7], можна прогнозувати ситуацію та керувати дорожнім рухом на всіх ділянках дорожньої мережі.

Подальший розвиток критеріїв оцінки стійкості транспортного потоку наведено у роботах [8, 9]. Авторами пропонується критерій, який оцінює стан руху транспортних засобів у потоці з урахуванням кількості смуг для руху та нерівномірності розподілу автомобілів у потоці за смугами руху. Автори пропонують нову характеристику для оцінки транспортного потоку – коефіцієнт "мобільності" автомобілів або нерівномірності їх руху по дорожній мережі. На думку авторів такий коефіцієнт є кількісною оцінкою якості організації дорожнього руху у місті, як добуток середньої дальності пробігу без затримок на середню швидкість потоку. Автори роблять висновок, що чим більше значення коефіцієнта мобільності, тим вище якість організації дорожнього руху. На нашу думку, запропонований коефіцієнт «мобільності» не

позбавлений недоліків. Він не враховує коливання щільності та інтенсивності транспортного потоку. Це знизить точність прогнозування затримок під час руху у потоці.

Підхід у моделюванні затримок під час руху автомобілів у потоці, розглянутий у роботі [10]. Авторами запропоновано критерій стійкості дорожнього руху з урахуванням багатосмугового руху, взаємного впливу автомобілів під час руху та затримок під час руху. Критерій враховує: дальність поїздки та швидкість руху; час затримок автомобілів під час руху; нерівномірність чи нестійкість руху, яку автори враховують градієнтом щільності транспортного потоку. Позитивним моментом даної роботи є використання такої фізичної величини, як градієнт. Градієнт вказує швидкість та напрямок зміни щільності транспортного потоку під час руху на певній ділянці дороги, що підвищить точність прогнозування.

Підхід до вивчення нерівномірності транспортних потоків представлений у роботі [11]. Автори запроваджують поняття інтегральної (техногенної небезпеки) транспортних потоків на міській дорожній мережі. Вводиться таке поняття, як «просторово-тимчасова ємність транспортного потоку», яка розраховується як добуток інтенсивності руху на щільність транспортного потоку, розмірність $1/м\cdot с$. Дано визначення градієнта швидкості транспортного потоку, який визначається як відношення прискорення автомобілів у транспортному потоці до швидкості руху в потоці. При цьому величину прискорення автори ідентифікують як внутрішню енергію транспортного потоку. На наш погляд, облік прискорення в транспортному потоці є перспективним методичним прийомом. Сучасні електронні засоби реєстрації дозволяють визначати негативну чи позитивну величину прискорення та передавати її до інформаційних центрів в онлайн режимі.

Аналогічний підхід до моделювання транспортного потоку представлено авторами роботи [12]. У цій статті основна увага приділяється двом фундаментальним явищам: стійкості руху автомобілем за тим, хто рухається попереду і коливаннями транспортного потоку. Автори визначають мінімальні та максимальні значення амплітуд коливань швидкості руху в потоці та напрямки їх зміни. Потім знаходять кореляцію коливань із стійкістю транспортного потоку. Проведені авторами дослідження показали, що чим менше амплітуди коливань швидкості в потоці, тим вище стійкість транспортного потоку. У роботі запропоновано рекомендації щодо зниження амплітуди коливань швидкості під час руху в потоці, наприклад, застосуванням автоматизованих систем керування рухом.

Саме такий підхід, де використовується облік коливань параметрів транспортного потоку, застосований у роботах [13-15]. Авторами досліджується коливання щільності потоку та їх кореляція зі коливаннями часу у дорозі, пов'язаними із значними заторами. Цей метод має додаткові переваги самокалібрування та адаптації до зовнішніх умов. У цих роботах представлено подальший розвиток моделей руху автотранспортних потоків методами механіки суцільного середовища. Розглянуто випадок змінної швидкості поширення збурень, побудовано графік її залежності від щільності потоку. Наведено результати розрахунків руху потоку з урахуванням в'язкопружних ефектів. Іншими словами, проводиться облік ефектів другого порядку, а саме оцінки водієм градієнтів швидкості між своїм автомобілем і транспортними засобами, що знаходяться поблизу (попереду). Це дозволяє прогнозувати дорожню ситуацію як на підставі поточного значення щільності потоку, а й можливе ущільнення чи розрідження потоку, виходячи з аналізу градієнтів швидкості. Робиться висновок, що збільшення часу між затримками автомобілів під час руху в потоці та зменшення часу затримок, позитивно впливає на стійкість транспортного потоку.

Представлений аналіз стратегій та математичних моделей оцінки стійкості транспортних потоків на дорогах та автомагістралях до заторів та затримок під час руху дозволяє зробити наступні висновки. Основними параметрами, що характеризують процес, є: мінімальні та максимальні значення амплітуд коливань швидкості в потоці та напрямки їх зміни. З аналізу представлених робіт випливає, що такі коливання корелюють зі коливаннями часу знаходження транспортного засобу в дорозі та наявністю заторів на маршруті.

На підставі даних висновків можна стверджувати, що розробка критеріїв оцінки стійкості транспортного потоку інформативними є такі параметри, як градієнт щільності та градієнт швидкості в транспортному потоці. Такі фізичні величини дозволяють враховувати наявність коливань у потоці, їх величину та напрямок (збільшення чи зменшення). При цьому величину прискорення деякі автори ідентифікують як внутрішню енергію транспортного потоку.

Для прогнозування виникнення заторів на маршрутах дорожньої мережі, а також для оцінки запасу стійкості транспортного потоку на ділянках, що аналізуються, необхідно розробити критерій оцінки стійкості транспортного потоку. Під стійкістю транспортного потоку будемо розуміти здатність транспортних засобів зберігати швидкість і напрямок руху за наміченим маршрутом вуличної дорожньої мережі або магістралі без затримок і заторів, незважаючи на збурення, що впливають на них [1].

Найбільш ефективним, на наш погляд, є добре розроблений та апробований математичний апарат теорії автоматичного управління, де досліджуються динамічні процеси за допомогою диференціальних рівнянь [16, 17]. Розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі, що аналізуються, при дії збурень, дозволить аналізувати та прогнозувати виникнення заторів та затримок залежно від зміни різних факторів та розробляти заходи щодо їх усунення.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі та прогнозування запасу стійкості при дії зовнішніх збурень.

Виклад основного матеріалу. При розробці критерію оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі та прогнозування запасу стійкості при дії зовнішніх збурень, скористаємося диференціальним рівнянням, яке відображає динаміку зміни транспортного потоку в часі. Рівняння отримано в роботі [1]:

$$(T_1 T_2 T_3) p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1) p + K_2 K_3 + 1 = (K_1 K_2 T_3) p + K_1 K_2, \quad (1)$$

де K_1, K_2, K_3 – коефіцієнти підсилення, безрозмірні величини, формули для розрахунку наведено в роботі [1];

де T_1, T_2, T_3 – постійні часу, розмірність секунда, формули для розрахунку наведено в роботі [1].

Диференціальне рівняння третього порядку записано в операторній формі, де $p=d/dt$, оператор диференціювання. Аналіз диференціального рівняння (1) наведено в роботі [1].

Для аналізу стійкості технічних систем розроблено ряд спеціальних методів, які в теорії автоматичного управління отримали назву критеріїв стійкості [16, 17]. При цьому всі критерії базуються на теорії стійкості технічних систем, розробленої Ляпуновим.

Алгебраїчний критерій, критерій Гурвіца, є найпоширенішим критерієм і застосовується, коли відомо характеристичне рівняння. Як характеристичне рівняння виступає ліва частина диференціального рівняння в операторній формі (1).

Запишемо характеристичне рівняння, здійснивши заміну та прирівнявши його до нуля:

$$A_0 p^3 + A_1 p^2 + A_2 p + A_3 = 0, \quad (2)$$

де:

$$A_0 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3, c^3, \quad (3)$$

$$A_1 = T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3, c^2, \quad (4)$$

$$A_2 = T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1, c, \quad (5)$$

$$A_3 = K_2 \cdot K_3 + 1. \quad (6)$$

Відповідно до алгебраїчного критерію стійкості Гурвіца технічна система є стійкою, якщо всі коефіцієнти A_i характеристичного рівняння (2) позитивні. Це необхідна умова стійкості [16, 17].

Достатня умова стійкості – всі визначники з коефіцієнтів A_i характеристичного рівняння (2) є позитивними [16, 17]. Якщо хоча б один із визначників дорівнює нулю, то система знаходиться на межі втрати стійкості. Якщо хоча б один із визначників негативний, то система нестійка.

Відповідно до правил запишемо всі визначники для характеристичного рівняння (2):

$$\Delta_1 = A_1 > 0; \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 \\ A_0 & A_2 \end{vmatrix} = A_1 \cdot A_2 - A_0 \cdot A_3 > 0; \quad (8)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 & 0 \\ A_0 & A_2 & 0 \\ 0 & A_1 & A_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & A_3 \\ A_0 & A_2 \end{vmatrix} A_3 > 0 = (A_1 \cdot A_2 - A_0 \cdot A_3) \cdot A_3 > 0 \quad (9)$$

Вираз (9) є необхідною та достатньою умовою сталого функціонування транспортного потоку за критерієм Гурвіца. Використовуючи цей вираз, можна визначити діапазон стійкого функціонування транспортного потоку - діапазон робастності. Чим більше значення Δ_3 , розмірність c^3 , тим більше запас робастності транспортного потоку.

При значенні $\Delta_3 = 0$, транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості, при негативних значеннях Δ_3 , настає втрата стійкості - затор.

Для порівняння транспортних потоків та побудови рейтингу за запасом сталого функціонування, необхідно отримати безрозмірний параметр – критерій, який залежить від усіх перерахованих вище факторів. Найбільш прийнятним, для аналізу стійкості технічних систем з урахуванням алгебраїчного критерію Гурвіца, є вираз (9).

На підставі сформульованого підходу запишемо критерій оцінки стійкості функціонування транспортного потоку - критерій робастності:

$$RR = \frac{A_1 \times A_2}{A_0 \times A_3}. \quad (10)$$

Після підстановки замість A_i значень, представлених формулами (3) – (6), отримаємо такий вираз:

$$RR = \frac{[(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) \times (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1)]}{[(T_1 T_2 T_3 \times K_2 K_3) + T_1 T_2 T_3]}. \quad (11)$$

Аналіз виразу (11), який є критерієм стійкості (робастності) транспортного потоку, дозволяє сформулювати параметри, від яких залежить стійкість. Як впливає з виразів, за якими розраховуються коефіцієнти підсилення K_2 , K_3 , формули наведено в роботі [1], на стійкість транспортного потоку впливають щільність і інтенсивність потоку. Їх необхідно розраховувати для кожної ділянки дорожньої мережі або магістралі та підставляти у формулу (11). Постійні часу T_1 , T_2 , T_3 залежать від кваліфікації та психофізіологічних властивостей водія, ступеня його втоми, динамічних властивостей автомобіля та дорожніх умов. Їх необхідно визначати за формулами, які наведені у роботі [1], та підставляти у формулу (11).

Якщо величина критерію дорівнює одиниці – транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості. Якщо величина критерію менше одиниці – транспортний потік втратив стійкість, настає зупинка руху – затор. Якщо величина критерію більше одиниці – транспортний потік має стійкість, тобто, функціонує без затримок та заторів. Чим більша величина критерію, тим більший запас стійкості транспортного потоку.

З отриманих результатів теоретичних досліджень можна сформулювати визначення робастності транспортного потоку.

Робастність транспортного потоку (англ. *robust range*) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів.

Критерій робастності RR , формула (11), необхідно застосовувати під час аналізу дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Отриманий результат відрізняється від відомих, які наведені у огляді літературних джерел тим, що дозволяє шляхом моделювання визначити межі втрати стійкості – утворення заторів. Визначення граничних значень щільності та інтенсивності транспортного потоку, їх градієнтів, облік багатосмугового руху, дозволить розробляти заходи щодо запобігання заторам.

Подані результати є продовженням досліджень, що викладені у роботі [1]. Відрізняються від відомих тим, що враховують динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків, що застосовуються у перерахованих роботах, враховуються динамічні властивості транспортних засобів та багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, критерій стійкості транспортного потоку має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних. На контрольованій ділянці дорожньої мережі необхідно визначати щільність та інтенсивність потоку, швидкість та прискорення руху транспортних засобів у потоці. Сучасні електронні засоби контролю дозволяють виконати такі вимірювання, проте потребують певних витрат. Крім цього, статистично визначеними величинами є час реакції водіїв на зміну дорожньої ситуації та наявність пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці дороги.

Висновки. 1. Розроблено критерій стійкості (робастності) транспортного потоку, сформульовано параметри, від яких залежить стійкість. До таких параметрів відносяться градієнт щільності та градієнт швидкості транспортного потоку. За аналогією зі стійкістю динамічних технічних систем отримано вираз оцінки критерію стійкості транспортного потоку. Показано, що при величині критерію рівної одиниці транспортний потік функціонує на межі втрати стійкості. Якщо величина критерію менше одиниці – транспортний потік втратив стійкість, настає зупинка руху – затор. Якщо величина

критерію більше одиниці – транспортний потік має стійкість, тобто, функціонує без затримок та заторів. Чим більша величина критерію, тим більший запас стійкості.

2. Дано визначення робастності транспортного потоку. Робастність транспортного потоку (англ. robust range) – це безрозмірна величина, яка характеризує діапазон стійкого руху транспортних засобів на ділянках дорожньої мережі з урахуванням її інфраструктури, щільності та інтенсивності руху без затримок та заторів. Показано, що критерій робастності RR можна застосовувати під час аналізу дорожньої мережі на виникнення затримок під час руху та заторів, а також при проектуванні нової міської дорожньої мережі.

Подальший напрямок досліджень, на наш погляд, лежить у площині створення розрахункових моделей щодо визначення щільності та інтенсивності транспортного потоку, прогнозування значень градієнтів щільності та швидкості руху транспортних засобів у потоці. Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі та магістралей.

Наступна стаття буде продовженням цієї роботи і присвячена результатам моделювання стійкості транспортного потоку при зміні вхідних параметрів. Використовуючи розроблений критерій робастності, будуть побудовані залежності зміни даного критерію від вхідних параметрів, що дозволить побудувати їх рейтинг впливу на стійкість.

Список літератури

1. Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі. / В.А. Войтов та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38). С. 236-245
2. Kessels, F. (2019). Introduction to Traffic Flow Modelling. In: Traffic Flow Modelling. EURO Advanced Tutorials on Operational Research. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78695-7_1
3. Hoogendoorn S., Bovy P. H. L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering*. 2001. 215:283-303. DOI:10.1243/0959651011541120
4. Zhu, Y., Wu, Q. & Xiao, N. Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method. *Sci Rep* . 2022. 12, 19919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24469-y>
5. Marcello Montanino, Julien Monteil, Vincenzo Punzo. From homogeneous to heterogeneous traffic flows: Lp String stability under uncertain model parameters. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. Vol. 146. P. 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.009>
6. Saeed Mohammadian, Zuduo Zheng, Md. Mazharul Haque, Ashish Bhaskar. Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2021. Vol. 147. P. 132-167. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007>
7. Jiping Xing, Wei Wu, Qixiu Cheng, Ronghui Liu. Traffic state estimation of urban road networks by multi-source data fusion: Review and new insights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2022. Vol. 595. 1. 127079. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127079>
8. Гук В.І., Шкодовський Ю.М. Транспортні потоки: теорія та їх застосування в урбаністиці: монографія. Х.: Золоті сторінки, 2009. 232 с.
9. Гук В.І., Запорожцева О.В. Взаємозв'язок інтенсивності, швидкості і щільності транспортних потоків на багатосмугових автомагістралях. *Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр.* 2010. Вып. 50. С. 69– 73.
10. Запорожцева Е.В. Распределение задержек автомобилей на автомагистралях. *Вестник ХНАДУ*. 2013. Вып.61-62. С. 102 – 105.
11. Жданов В.Л. Анализ информативного признака емкости транспортного потока как критерия оценки уровня его интегральной опасности. *Вестник КузГТУ. Автомобильный транспорт*. 2008. С. 12 – 17.
12. Jie Sun, Zuduo Zheng, JianSun. The relationship between car following string instability and traffic oscillations in finite-sized platoons and its use in easing congestion via connected and automated vehicles with IDM based controller. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2020. Vol. 142. P. 58-83 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.004> .

13. Kieran Kalair, Colm Connaughton. Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 127. 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178>.
14. Смирнова М.Н., А. И. Богданова А.И., Zhu Z.J., Маненкова А.С., Смирнов Н.Н. Математическая модель автотранспортных потоков с элементами вязкоупругости. *Матем. моделирование*. 2014. Т.26. № 7. С. 54–64
15. Geng Zhang, Yu Zhang, Dong-bo Pan, Chun-yan Sang. Study on the interval integration effect of vehicle's self-delayed velocity on traffic stability in micro traffic modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019. Vol. 533. 1. 121941. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121941>
16. Mykolaiets D., Klen K. Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work. Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute, 2020. 45 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282>
17. Isidori A. Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)* , 2009. Pp. 147-172. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9
18. Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. / Vojtov V. et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, no. 3 (100). Pp. 15-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064.
19. Muzylyov D., Shramenko N., Karnaukh M. (2021) Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22.

References

1. Vojtov, V.A., Kravtsov, A.H., Karnaukh, M.V., Horyayinov, O.M., Kozenok, A.S. & Babych, I.A. (2023) Otsinka erhonomichnoyi stiykosti transportnoho potoku na dil'nytsyakh dorozhn'oyi merezhi. Identyfikatsiya matematychnoyi modeli [Identification of a mathematical model]. *Tsentrал'ноукраїнський науковий вісник. Технічні науки – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Issue 7(38)*, 236-245 [in Ukrainian].
2. Kessels, F. (2019). Introduction to Traffic Flow Modelling. In: *Traffic Flow Modelling. EURO Advanced Tutorials on Operational Research*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78695-7_1 [in English].
3. Hoogendoorn, S. & Bovy, P. H. L. (2001) State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering*, 215:283-303. DOI:10.1243/0959651011541120 [in English].
4. Zhu, Y., Wu, Q. & Xiao, N. (2022) Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method. *Sci Rep*, 12, 19919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24469-y> [in English].
5. Marcello Montanino, Julien Monteil, Vincenzo Punzo. (2021). From homogeneous to heterogeneous traffic flows: Lp String stability under uncertain model parameters. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 146, Pages 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.009> [in English].
6. Saeed Mohammadian, Zuduo Zheng, Md. Mazharul Haque & Ashish Bhaskar. (2021). Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 147, Pp. 132-167 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007> [in English].
7. Jiping Xing, Wei Wu, Qixiu Cheng & Ronghui Liu. (2022). Traffic state estimation of urban road networks by multi-source data fusion: Review and new insights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 595, 1, 127079. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127079> [in English].
8. Huk, V.I. & Shkodovs'kyi, Yu.M. (2009). *Transportni potoky: teoriya ta yikh zastosuvannya v urbanistytsi* [Transport flows: theory and their application in urbanism]. Kharkiv: Zoloti storinky [in Ukrainian].
9. Huk, V.I. & Zaporozhtseva, O.V. (2010). Vzayemozv'yazok intensyvnosti, shvydkosti i shchil'nosti transportnykh potokiv na bahatosmuhovykh avtomahistryalakh [Interrelationship of intensity, speed and density of traffic flows on multi-lane highways]. *Vestnyk KHNADU: sb. nauch. tr. – Herald of the KhNARU*, Issue 50, 69– 73 [in Ukrainian].
10. Zaporozhtseva, Ye.V. (2013). Raspredeleniye zaderzhek avtomobiley na avtomogistryalakh [Distribution of vehicle delays on highways.]. *Vestnik KHNADU – Herald of the KhNARU*, Issue.61-62, 102 – 105 [in Ukrainian].
11. Zhdanov, V.L. (2008). Analiz informativnogo priznaka yemkosti transportnogo potoka kak kriteriya otsenki urovnya yego integral'noy opasnosti [Analysis of the informative sign of the capacity of the transport flow as a criterion for assessing the level of integral danger]. *Vestnik KuzGTU, Avtomobil'nyy transport – Herald of KuzGTU. Automobile transport* [in Ukrainian].
12. Jie Sun, Zuduo Zheng & Jian Sun. (2020). The relationship between car following string instability and traffic oscillations in finite-sized platoons and its use in easing congestion via connected and automated

- vehicles with IDM based controller. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 142, Pp. 58-83. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.004> [in English].
13. Kieran Kalair & Colm Connaughton. (2021). Anomaly detection and classification in traffic flow data from fluctuations in the flow–density relationship. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 127, 103178. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103178> [in English].
 14. Smirnova, M.N., Bogdanova, A.I., Zhu, Z.J., Manenkova, A.S. & Smirnov, N.N. (2014). Matematicheskaya model' avtotransportnykh potokov s elementami vyazkouprugosti [Mathematical model of motor vehicle flows with viscoelasticity elements]. *Matem. modelirovaniye – Math. modeling*, Vol. 26, 7, 54–64 [in Ukrainian].
 15. Geng Zhang, Yu Zhang, Dong-bo Pan & Chun-yan Sang. (2019). Study on the interval integration effect of vehicle's self-delayed velocity on traffic stability in micro traffic modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 533, 1, 121941. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121941> [in English].
 16. Mykolaiets, D. & Klen, K. (2020). Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work. Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282> [in English].
 17. Isidori, A. (2009). Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)*, pp. 147-172. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9 [in English].
 18. Vojtov, V., Kutiy, O., Berezhnaja, N., Karnaukh, M. & Bilyaeva, O. (2019). Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, no. 3 (100), pp. 15-21 [in English].
 19. Muzylyov, D., Shramenko, N. & Karnaukh, M. (2021). Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham [in English].

Andrii Kravtsov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Larina**, Prof., DSc., **Oleksiy Goryayinov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Tetiana Gorodetska**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

Justification of the Criterion of Stability of the Traffic Flow at the Sections of the Road Network

The work considers the justification and obtaining the criteria for assessing the stability of the traffic flow on various sections of the street and road network under the influence of external disturbances. Analysis of the criterion allows to formulate the parameters on which stability depends. As follows from the expressions by which the criterion is calculated, the stability of the traffic flow is affected by the density and intensity of the traffic flow. They must be calculated for each section of the road network or highway in the form of amplification factors. The time constants depend on the qualification and psychophysiological properties of the driver, the degree of his fatigue, the dynamic properties of the car and road conditions. It is shown that when the value of the criterion is equal to one, the transport flow functions on the verge of loss of stability. If the value of the criterion is less than one, the traffic flow has lost its stability, traffic stops - traffic jam. If the value of the criterion is greater than one, the transport flow is stable, i.e. functions without delays and traffic jams. The larger the value of the criterion, the greater the margin of stability.

Based on the obtained results of theoretical studies, the robustness of the traffic flow is defined. The robustness of the traffic flow (English robust range) is a dimensionless value that characterizes the range of stable movement of vehicles on sections of the road network, taking into account its infrastructure, density and intensity of traffic without delays and traffic jams.

It is shown that the developed criterion of robustness must be applied in the analysis of the road network for the occurrence of delays during traffic and traffic jams, as well as in the design of a new urban road network. The obtained result differs from the known ones given in the review of literary sources in that it allows to determine the limits of the loss of stability - the formation of traffic jams - through modeling. Determining the limit values of traffic flow density and intensity, their gradients, accounting for multi-lane traffic will allow developing measures to prevent traffic jams.

traffic flow, modeling, dynamic model, density gradient, speed gradient, amplification factor, time constant, stability criterion, traffic flow robustness criterion

Одержано (Received) 17.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

І.А. Шльончак, доц., канд. техн. наук, **А.П. Солтус**, проф., д-р техн. наук, **М.П. Рудь**, доц., канд. техн. наук

Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua; Igor_Shlionchak@ukr.net

Аналіз можливості застосування технології blockchain у сфері управління ланцюгами постачань

В статті виконано детальний аналіз вітчизняного та закордонного досвіду використання технології blockchain. Показано позитивний досвід такого використання. Акцентовано увагу на перевагах і недоліках даної технології. Проведено моніторинг доходів відомих світових компаній, що застосовують зазначену технологію. Підкреслено можливість ефективного використання blockchain-технології в сфері управління ланцюгами постачань в українській перспективі, особливо беручи до уваги європейський вектор розвитку країни.

управління ланцюгом постачань, ланцюг постачань, технології управління, цифровий формат, трансакції

Постановка проблеми. Життя людини в сучасному світі все швидше та популярніше перетворюється в цифровий формат. Така тенденція спостерігається практично в будь якій сфері життєдіяльності людини. І управління ланцюгами постачань не є винятком. Саме у сфері управління ланцюгами постачань цифровий підхід до вирішення різноманітних задач є надзвичайно актуальною задачею, що ставиться сьогодні перед науковцями. Адже застосування «цифри» в сфері управління ланцюгами постачань є гарантією ефективного їх функціонування з точки зору, наприклад, зниження затрат і часу. Існують чимало різних технологій підвищення ефективності роботи ланцюгів постачань. Однак, їх застосування – це один з найефективніших способів поліпшення управління ланцюгами постачань у логістичній діяльності людини. Завдяки таким технологіям ті чи інші бізнес-процеси постійно трансформуються в інтернет-мережі. Однією із відомих цифрових технологій, що зарекомендувала себе як ефективний цифровий інструмент, є технологія blockchain [1].

Постановка завдання. Метою роботи є проведення аналізу можливості застосування технології blockchain в сфері управління ланцюгами постачань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тематиці управління ланцюгами постачань та застосуванню в них цифрових технологій присвячено досить немало наукових розробок.

Так автор роботи [2] зазначає, що цифрові технології в логістичних системах супроводжуються проявом ефекту синергії. Автор має на увазі деяку взаємодію різних цифрових технологій, що призводять до спільного результату. В роботі передбачається, що останній буде більшим за сумарний результат у вигляді звичайної суми результатів від окремої дії кожної із взаємодіючих цифрових технологій. Серед сучасних технологій, що застосовуються в сфері управління ланцюгами постачань, автор виділяє такі: інтернет речей, хмарні обчислення, автономні роботи, штучний інтелект, безпілотні літальні апарати, 3D-друк, а також технологію blockchain. В роботі вибудовується схематичне зображення зв'язків вище зазначених цифрових технологій в контексті появи ефекту синергії (рис. 1) як можливість їх застосування в логістичних системах [2].

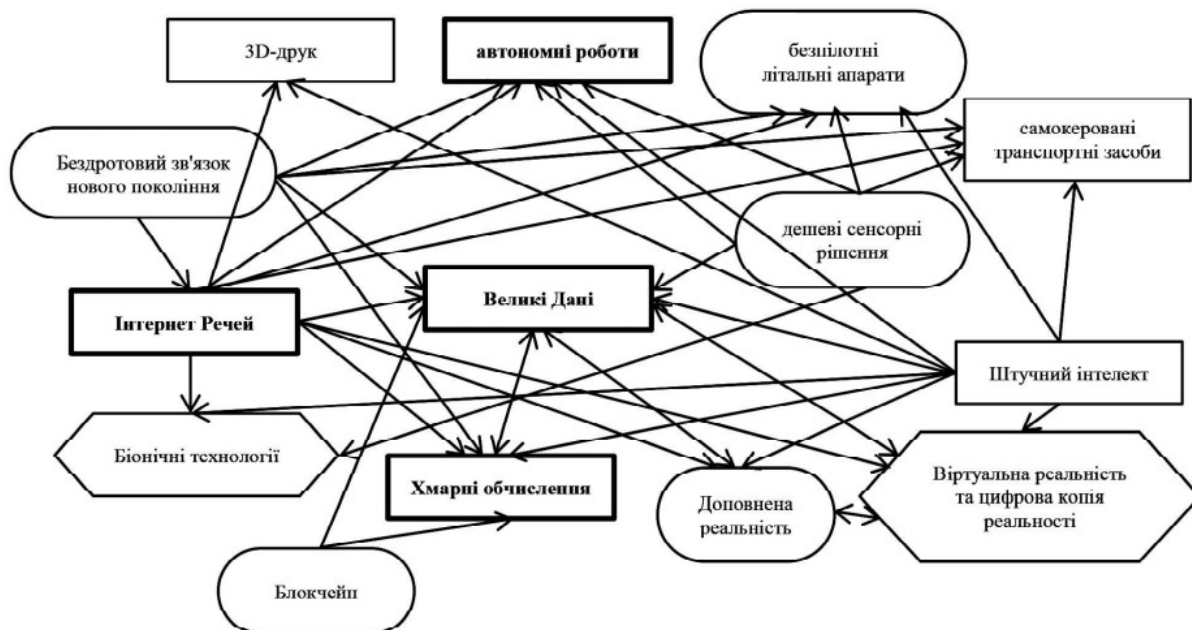


Рисунок 1 – Схематичне зображення зв'язків сучасних та перспективних цифрових технологій

Авторка статті [3] дослідила сутність та особливості вітчизняних логістичних систем. Разом з тим було взято до уваги досвід закордонних ланцюгів постачань та можливість застосування цифрових технологій в досліджуваних процесах. Цінним дослідженням в зазначеній роботі стала змістовна класифікація логістичних операцій. Була підтверджена ефективність цифрової технології blockchain в розв'язуванні необхідних завдань, пов'язаних з управлінням ланцюгами постачань в логістичних системах. Автор досить вдало обґрунтовує використання blockchain-технологій в управлінні ланцюгами постачань, надаючи основні переваги та недоліки таких цифрових технологій. Зазначається, що застосування вище зазначеної технології істотно зменшує фінансові дотації в управлінні ланцюгами постачань.

З представлених досліджень було встановлено, що технологія blockchain має потенціал вирішувати цілу низку практичних питань, пов'язаних з логістичними системами. Технологія blockchain, за автором, – це прозорий публічний реєстр, що дає можливість відстежити маршрут руху вантажів впродовж всього логістичного процесу. Автор виділяє важливий аспект зазначеної технології, а саме: доступність всіх учасників логістичного процесу до відповідної мережі [3].

Автори роботи [4] висвітлюють використання blockchain-технології в контексті євроінтеграції України. Показано досвід європейських країн у застосуванні цифрових технологій трансформації економічної діяльності з перспективою перенесення такого досвіду на вітчизняний. Автори виділяють відповідні переваги України та зазначають можливість застосування цифрових технологій для підвищення ефективності експлуатації майнінг-ферм та криптовалюти за допомогою blockchain-технології. Було встановлено, що застосування даної технології сприяє розвитку торгівлі, промисловості та інших сфер людської діяльності.

В інших дослідженнях застосування цифрових технологій, зокрема технології blockchain, показує можливість впровадження цієї технології в українську логістичну систему ланцюгів постачань. При цьому використовується досвід використання даної технології на прикладі США та Великобританії. Автори роботи виділяють можливість

ефективного використання blockchain-технології в різних сферах діяльності, зокрема проаналізовано досвід компаній з найвищим світовим рейтингом. Представлені результати досліджень показують ефективне впровадження blockchain-технології в Україні на теоретико-методологічному рівні. Зазначається, що blockchain-технології, як високорівнева база даних, допомагає побудувати клієнтоорієнтований підхід, зберігаючи власну інформацію та прозорість [5].

Автори ще однієї наукової роботи висвітлюють технологію blockchain як таку, що має статус найсучасної технології і може використовуватись різноманітними компаніями, в тому числі і такими, які займаються управлінням ланцюгів постачань в логістичних системах. Однак, автори зазначають, що наслідки використання даної технології на підприємствах ще потребує додаткового дослідження. В дослідженнях представлені переваги технології blockchain, а саме: захищеність та дворівнева ідентифікація користувачів, послідовність ланцюгів зміни інформації, можливість створення бізнес-мови. До недоліків автори відносять: відсутність нормативної єдиної бази, зниження довіри користувачів технології та великі енерговитрати малих компаній [6].

Автори зазначають, що застосування сучасних цифрових технологій, зокрема технології blockchain, прямо пов'язано з доходом компанії, що таку технологію використовує. В роботі, наприклад, представлені дані про дохід відомих світових організацій, який почав зростати з моменту використання технології blockchain (табл. 1) [6].

Таблиця 1 – Дохід відомих світових організацій, млрд. грн, [6]

Назва організації	2015	2016	2017	2018	2019
Amazon	107	136	178	233	281
Facebook	179	276	406	558	707
Nestle	88	89	89	91	93
Oracle	88	89	90	91	92
Visa	14	15	18	21	23
Adobe	4,7	5,8	7,2	8,8	11,1
Walt Disney	5,2	5,5	5,5	5,9	6,9
NIKE	3	3,2	3,4	3,6	3,9
Goldman Sachs	3,7	3,6	4,2	4,9	5,6
McDonald's	2,6	2,5	2,2	2,1	2,1

Джерело: [6]

Автор роботи [7] досліджує ланцюги постачань, як такі, що трансформувалися на складні мережі створення цінностей і стали важливим джерелом конкурентної переваги. При цьому спостерігається ускладнення в перевірці джерела сировини та підтримці прозорості процесу створення вартості вантажів на відповідному етапі ланцюга постачань. Дослідник передбачає ефективність використання цифрових технологій, зокрема і технології blockchain, для підвищення прозорості ланцюга створення вартості вантажів та довіри B2B (business-to-business).

Виклад основного матеріалу. Отже, ланцюг постачання – це послідовність процесів та інформації, які доставляють продукти чи послуги від постачальників, через виробництво і дистрибуції безпосередньо споживачеві. Потрібно зазначити, що увесь ланцюг постачання має бути абсолютно прозорим для усіх його учасників. Тому надзвичайно важливою сучасною задачею є оцифрування такого логістичного процесу.

Слід зазначити, що розвиток будь якої організації досить суттєво залежить від того, в якому стані перебуває логістична її інфраструктура та наскільки ця структура є оцифрованою. Як відомо, ланцюг постачання характеризується кількома напрямками, зокрема матеріальним, фінансовим та інформаційним. Технологія blockchain справно працює в сфері саме інформаційного забезпечення компанії.

Оскільки виробничі та логістичні операції стають все більш масштабними, організації постійно зустрічають нові перешкоди, контактуючи з різними учасниками логістичної системи. Як результат, вони потребують актуальної поточної інформації про кожен етап свого ланцюга постачання у будь-який конкретний момент часу. Традиційні підходи управління ланцюгом постачання вже не настільки ефективні, як це було якийсь час тому. Кілька десятків років назад, наприклад, бізнесу виконувати свою діяльність було набагато простіше, не застосовуючи при цьому адаптоване програмне забезпечення.

Однак, в умовах постійної конкуренції кожен етап ланцюга постачання потребує деталізації та конкретизації. При цьому компанії прагнуть підвищити рівень рентабельності, швидкість обслуговування та попит на кожному структурному елементі ланцюга постачання. Звичайно до уваги завжди береться ставлення такого важливого учасника логістичного процесу, як клієнт. Тому узгодження всіх напрямків логістичних процесів надзвичайно важливо в питанні ефективного функціонування будь якої компанії, що прагне розвиватися. Для підвищення функціонування організації, на думку автора даної роботи, необхідно застосувати цифрові технології в управлінні ланцюгами постачання.

Як було вже зазначено раніше вітчизняними та закордонними вченими [1-7], одним з можливих методів підвищення ефективності роботи компанії є оцифрування кожного етапу ланцюга постачання зокрема з використанням технології blockchain.

Згідно [8] blockchain-технології мають ряд переваг, а також і недоліків. До переваг використання цієї технології слід віднести наступне. Blockchain забезпечує безпековість в інформаційному напрямку розвитку підприємства, оскільки ця технологія – це, перш за все, цифрова база даних з власним надійним захистом. Дана перевага є досить серйозним аспектом, так як управління ланцюгом постачання кожної компанії зводиться частково також до клієнтських банківських рахунків.

З іншої сторони застосування blockchain-технології передбачає заощадження коштів. Дана перевага є суміжною з попередньою, оскільки напряму залежить від неї. Безпековість інформаційного простору є суттєвим показником надійної роботи цифрової системи. Blockchain – це надійна, з точки зору безпеки, цифрова система в управлінні ланцюгами постачання, що дозволяє мінімізувати велику кількість ризиків, які пов'язані саме з безпековою ситуацією компанії. Таким чином для забезпечення надійного інформаційного простору не потрібні інші посередники. Саме на цьому і відбувається заощадження фінансових ресурсів.

Ще однією перевагою досліджуваної цифрової системи в управлінні ланцюгами постачання є швидкоплинність процесів. Технологія blockchain насправді дозволяє перемінити різноманітні методи узгодження інформаційних ресурсів. Це істотно пришвидчує ті чи інші процеси, що відбуваються на підприємстві, зокрема і в управлінні ланцюгами постачання.

До переваг застосування вище зазначеної технології слід також віднести її вседоступність. Технологія blockchain – це універсальна цифрова технологія, яка може бути використана в багатьох сферах життєдіяльності людини, в тому числі й при управлінні ланцюгом постачання.

Однак, при всіх цих перевагах необхідно звернути також ретельну увагу і на недоліки даної технології, оскільки, як і будь яка технологія, технологія blockchain не є

досконалою. Найперше, про що потрібно згадати – це дороговизна цієї технології. Дійсно проблематика даної технології зводиться до ускладнення транзакційних операцій, що і призводить до здорожчання її використання. Як зазначалось раніше застосування технології blockchain дозволяє скоротити деякі витрати. Але разом з тим створити технологію та впровадити її у ту чи іншу сферу є завжди витратним.

З іншої сторони глобальність використання даної цифрової системи є одним із обмежуючих факторів її популяризації. Справа в тому, що через перевантаження єдиної бази даних швидкість транзакційних операцій дещо знижується.

Застосування технології blockchain дозволить представникам бізнесу минати найм додаткових робітників з метою збирання необхідних цифрових даних. При цьому користуватися сервісом посередників у сфері консалтингу також стає непотрібним, що заощаджує значні кошти. Останні можуть стати вільним додатковим резервом у користуванні компанії, ввійшовши в обіг для розвитку бізнесу. Це в свою чергу може стати позитивним фактором в розвитку вітчизняної економіки.

До прикладу ефективного використання blockchain-технологій слід віднести одну з європейських країн, а саме: Естонію. Однією з причин даного факту є державна підтримка цифрових технологій. Естонський проект є найуспішнішим зі світових реалізованих проєктів цифрової сфери. Необхідно зазначити, що ця європейська країна застосовує технологію blockchain практично у всіх сферах своєї життєдіяльності. Яскравим прикладом ефективного застосування даної технології є проведення реєстраційних операцій для підприємців. Як наслідок, в країні стала відсутньою необхідність створення великої кількості документів, а витрати на відповідні установчі операції значно знизилась [8].

Висновки. Підводячи підсумки, потрібно зазначити, що застосування blockchain- технології має величезні перспективи ефективного використання в цифровій сфері будь якої діяльності людини, зокрема і в управлінні ланцюгами постачань. В роботі були виділені основні переваги та недоліки згаданої технології з метою встановлення більшої ефективності її застосування в сфері управління ланцюгами постачань. На основі вище зазначеного слід зробити висновок, що цифрова технологія blockchain є перспективною системою в українському векторі євроінтеграції.

Список літератури

1. Arenkov I., Tsenzharik M., Vetrova M. Digital technologies in supply chain management. *Atlantis Highlights in Computer Sciences*. 2019. № 1. P. 453-458.
2. Скільцько В.І. Синергія цифрових технологій в логістичних системах. Київ: «Інвестиції: практика та досвід». 2018. № 16. С. 18-24.
3. Бурковська А. В., Сизоненко Ю. С. Напрями вдосконалення логістичної діяльності підприємств. *Modern Economics*. 2021. № 30(2021). С. 52-56.
4. Ніколаєв, С. О., Вороненко, В. І., Ковальов, Б. Л., Гриценко, П. В., Одеволе, О. О. Блокчейн як фактор цифрової трансформації економіки України. *Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка*. 2021. № 2. С. 16-23. DOI: 10.21272/1817-9215.2021.2-2
5. Жадько К. С., Носова Т. І., Горященко Ю. Г. Проблеми впровадження передових світових технологій в умовах цифрового бізнесу. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2022. №1 (77). С. 51-60.
6. Койбічук В.В., Рожкова М.С., Дослідження застосування блокчейн-технологій у діяльності світових підприємств: методичний підхід. *Приазовський економічний вісник*. 2020. №4(21). С.118-123.
7. Dursun T., Blockchain Technology for Supply Chain Management, *Industrial Engineering in the Internet-of-Things World*. 2022. P. 203-217.
8. Кучинський В. А., Крамський Д. Ю., Перерва П. Г. Переваги та недоліки технології блокчейн в умовах цифрової економіки. *Сучасні тенденції розвитку фінансових та інноваційно-інвестиційних процесів в Україні = Modern trends in the development of financial and innovation-investment processes in Ukraine* : матеріали 5-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 25 лютого 2022 р. / ред. кол.: В. В. Зянько, І. Ю. Єпіфанова ; Вінниц. нац. техн. ун-т. Електрон. текст. дані. Вінниця, 2022. С. 789-792.

References

1. Arenkov, I., Tsenzharik, M. & Vetrova, M. (2019) Digital technologies in supply chain management. *Atlantis Highlights in Computer Sciences*, № 1, 453-458 [in English].
2. Skits'ko, V.I. (2018). *Synerhiia tsyfrovoykh tekhnolohii v lohistychnykh systemakh [Synergy of digital technologies in logistics systems]*. Kyiv: "Investments: practice and experience", № 16. 18-24 [in Ukrainian].
3. Burkovs'ka, A.V., Syzonenko, Yu.S. (2021). Napriamy vdoskonalennia lohistychnoi diialnosti pidpriemstv [Directions of improvement of logistics activity of enterprises.]. *Modern Economics*, № 30, 52-56 [in Ukrainian].
4. Nikolaiev, S.O., Voronenko, V.I., Kovalov, B.L., Hrytsenko, P.V. & Odevole, O.O. (2021). Blokchejn iak faktor tsyfrovoi transformatsii ekonomiky Ukrainy [Blockchain as a factor in the digital transformation of the economy of Ukraine] . *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu – Bulletin of Sumy State University. Economy series*, 2, 16-23 [in Ukrainian].
5. Zhadko, K.S. (2022). Problemy vprovadzhenia peredovykh svitovykh tekhnolohij v umovakh tsyfrovoho biznesu . [Problems of implementing advanced global technologies in the conditions of digital business]. *Naukovyj pohliad: ekonomika ta upravlinnia – Scientific view: economics and management*, 1 (77), 51-60 [in Ukrainian].
6. Koibichuk, V.V. & Rozhkova, M.S., (2020). Doslidzhennia zastosuvannia blokchein-tekhnolohii u diialnosti svitovykh pidpriemstv: metodychni pidkhid [Research on the application of blockchain technologies in the activities of global enterprises: a methodical approach], *Pryazovsky Economic Bulletin – Pryazovsky Economic Bulletin*, 4(21), 118-123 [in English].
7. Dursun, T. (2022). Blockchain Technology for Supply Chain Management. *Industrial Engineering in the Internet-of-Things World*, 203-217 [in Ukrainian].
8. Kuchynskiy, V.A., Kramskiy, D.Yu. & Pererva, P.G. (2022) . Perevahy ta nedoliky tekhnolohii blokchein v umovakh tsyfrovoi ekonomiky [Advantages and disadvantages of blockchain technology in the conditions of the digital economy]. *Modern trends in the development of financial and innovation-investment processes in Ukraine : 5-a Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (25 liutoho 2022 r., Vinnytsia) – 5th International Science and Practice Conference (pp.789-792)*. Vinnytsia: National Technical Univ. Electron [in Ukrainian].

Ihor Shlionchak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anatoliy Soltus**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Maksym Rud**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Cherkassy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

Analysis of the Possibility of Applying Blockchain Technology in the Field of Supply Chain Management

Human life in today's world is increasingly becoming faster and more popular in the digital format. Such a trend is observed in almost any sphere of human activity. And supply chain management is no exception. It is in the field of supply chain management that a digital approach to solving various problems is an extremely urgent task facing scientists today.

The article provides a detailed analysis of the domestic and foreign experience of using blockchain technology. Positive experience of such use is shown. Attention is focused on the advantages and disadvantages of this technology. Monitoring of revenues of well-known global companies using the specified technology was carried out. The possibility of effective use of blockchain technology in the field of supply chain management in the Ukrainian perspective is emphasized, especially taking into account the European vector of the country's development. One of the European countries, namely Estonia, can be cited as an example of the effective use of blockchain technologies. One of the reasons for this is state support for digital technologies. The Estonian project is the most successful of the world's digital projects.

Summing up, it should be noted that the application of blockchain technology has great prospects for effective use in the digital sphere of any human activity, in particular, in the management of supply chains. In the work, the main advantages and disadvantages of the mentioned technology were highlighted in order to establish greater efficiency of its application in the field of supply chain management. Based on the above, it should be concluded that blockchain digital technology is a promising system in the Ukrainian vector of European integration.

supply chain management, supply chain, management technologies, digital format, transactions

Одержано (Received) 01.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 12.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

І.О. Кузєв, ст. викл.

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,
м.Кременчук, Україна*

e-mail: Igor-kuzev@ukr.net

Гібридні конструкції балок на транспорті із застосуванням металу

Виконати аналіз можливого застосування гібридних та комбінованих конструкцій для перекриттів будівель та споруд цивільного та промислового призначення, у тому числі на транспорті, розширити номенклатуру балкових конструкцій, розробити інноваційне конструктивне рішення гібридної балки, що має низьку матеріаломісткість при підвищеній надійності.

Аналіз переваг відомих гібридних конструкцій, які застосовуються для їх проектування матеріалів, розрахунок металокомпозитної балки із застосуванням існуючих інженерних методик. Наводяться нові розробки балок із застосуванням сталобетону та композитних матеріалів для проектування та посилованих конструкцій.

споруда, гібридна конструкція, балка перекриття, чисельний розрахунок, надійність, довговічність

Постановка проблеми. Гібридні та комбіновані конструкції зі сталобетону, стале-залізобетону все частіше застосовуються в каркасах будівель та транспортних спорудах [1], у тому числі з використанням біонічного підходу [2]. Застосування подібних конструкцій дозволяє знизити витрату сталі, масу несучої конструкції об'єкта, трудомісткість її виготовлення при підвищенні надійності та довговічності. Дуже перспективним напрямом щодо вдосконалення несучих елементів будівель та споруд є гібридні конструкції із застосуванням композитів, зокрема залізобетонні та металеві конструкції із системами зовнішнього армування з композитних сіток або ламінатів [3–5]. Номенклатура гібридних і комбінованих конструкцій в Україні та світовій практиці будівництва розвинена поки що недостатньо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сьогодишній традиції досі переважає використання металу та бетону. Ці матеріали мають високі показники міцності, довговічності, добре вивчена їх робота в різних середовищах, в тому числі при високим сейсмічним і вітровим навантаженням. У зв'язку з цим, протягом тривалого періоду вони були прийнятним вибором для переважної більшості будівель і споруд [2].

У роботі використані фундаментальні праці: Dragobetskii V., Shapoval A., Markov , Vorobyov V. [1,2,3,4,7] та ін., а також власний особистий досвід роботи на транспорті [6, 12-15].

Постановка завдання. Мета – визначити аналіз можливого застосування конструкцій для будівель і споруд громадянського та промислового призначення, в тому числі на транспорті, розширити номенклатуру балочних конструкцій, розробити інноваційне конструктивне рішення балки, що володіє низькою матеріалоемністю при підвищеній надійності і довговічності конструкції. Методи роботи – експертна оцінка спроби зміни моделі ринку вантажних залізничних перевезень; аналіз причин розбалансування економічного механізму перевізної діяльності у сфері вантажних залізничних перевезень; спроба структурувати цілі результативного ринку вантажних залізничних перевезень.

Виклад основного матеріалу. Застосування гібридних сталобетонних конструкцій ефективно переважно у стиснених елементах: колонах, опорах, стиснутих частинах балок та ферм, підкранових балок, рамних та арочних конструкцій. При цьому бетон іноді можна розташовувати в розтягнутих частинах конструкцій, але з урахуванням обтиснення бетону за рахунок його попередньої напруги [8]. Розроблено цілу низку комбінованих балкових конструкцій будівель та споруд із застосуванням сталобетону, які розроблені за участю автора [8–10]. В окремих випадках під важке транспортне навантаження можливе застосування сталефібробетону, що дозволяє суттєво підвищити тріщиностійкість бетону за відсутності стрижневої попередньо напруженої арматури [11].

Застосування металокомпозитних конструкцій для балок може бути ефективно в агресивних умовах експлуатації та великій витраті сталі. Крім того, застосування композитів може бути раціонально як посилення експлуатованих конструкцій, які неприпустимо послаблювати при ремонті зварюванням або отворами під болти. Виконано пошук конструктивних рішень гібридних балок. [12]. За участю автора запропоновано інноваційну металокомпозитну балку, що захищається патентним рішенням [13].

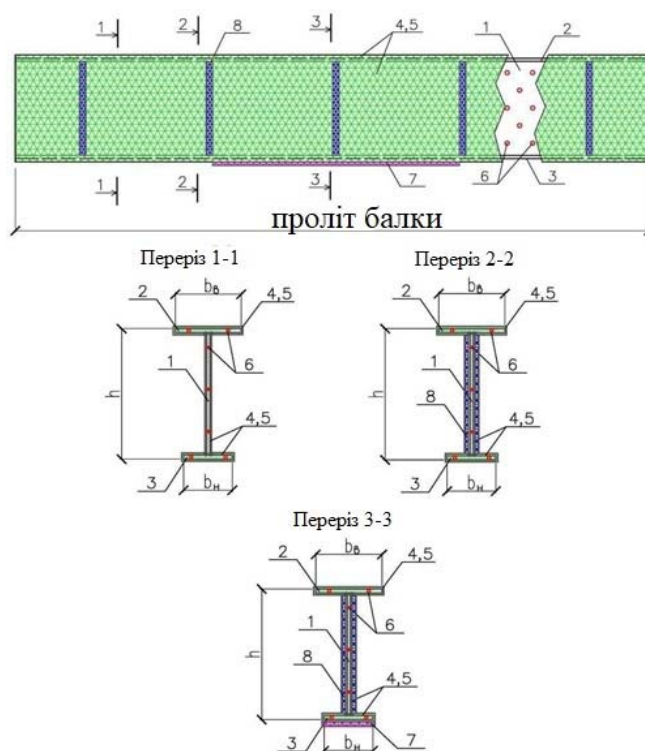
Пропонована балка складається зі стінки, верхнього та нижнього поясів, які складені у двотавровий поперечний переріз і виконані з листової тонкостінної сталі, балка може мати несиметричний поперечний переріз з більш розвинутим верхнім поясом для підвищення стійкості балки та компенсації низької міцності. Сти композиту на стиск, до поверхні стінки та поясів по всьому периметру елементів приклеєна композитна тканина за допомогою епоксидного клею, при цьому стінка та пояси мають перфорацію по всій площі елементів (рис. 1). Композитна тканина, приклеєна до поверхні поясів, може мати збільшену товщину у вигляді накладки в середній частині по довжині балки, де виникають максимальні нормальні напруження від прикладених навантажень. Композитна тканина, приклеєна до поверхні стінки, може мати збільшену товщину у вигляді поперечних ребер (наприклад, композитних куточків), розташованих з рівномірним кроком по довжині балки, що забезпечує місцеву стійкість тонкої стінки.

Як композитний матеріал пропонується використовувати полімерну основу, посилену вуглецевими волокнами (вуглепластик) або борними волокнами (боропластик). Борні волокна мають високу чутливість до концентраторів напруг, ніж пояснюються.

Волокна бору випускаються у вигляді моноволокон, комплексних ниток та стрічок. Наявність композитної тканини з епоксидним клеєм на поверхні стінки та поясів підвищує місцеву стійкість елементів, що несе здатність балки в цілому, знижує витрату сталі і, як наслідок, знижує матеріаломісткість балки.

Наявність композитної тканини з епоксидним клеєм на поверхні стінки та поясів також захищає елементи балки від корозійного зносу, зменшує експлуатаційні витрати на відновлення захисного покриття балки та підвищує її експлуатаційну надійність.

Несуча здатність металокомпозитної балки забезпечується підбором марки сталі, складу композиту, розмірів поперечного перерізу балки та її елементів. Розрахунки запропонованої металокомпозитної балки були виконані із застосуванням методики для подібних конструкцій з СТО та чисельним моделюванням у обчислювальному комплексі SCAD (рис. 2). Усі елементи балки моделювалися пластинчастими кінцевими елементами з розмірами осередків до 0,1–0,2 м.



- 1 - сталеві стінки, 2 - сталевий верхній пояс, 3 - сталевий нижній пояс,
 4 - композитна тканина, 5 - шар епоксидного клею, 6 - перфорація, 7 - накладка,
 8 - поперечне ребро

Рисунок 1 – Конструкція металокомпозитної балки

Джерело: розроблено автором

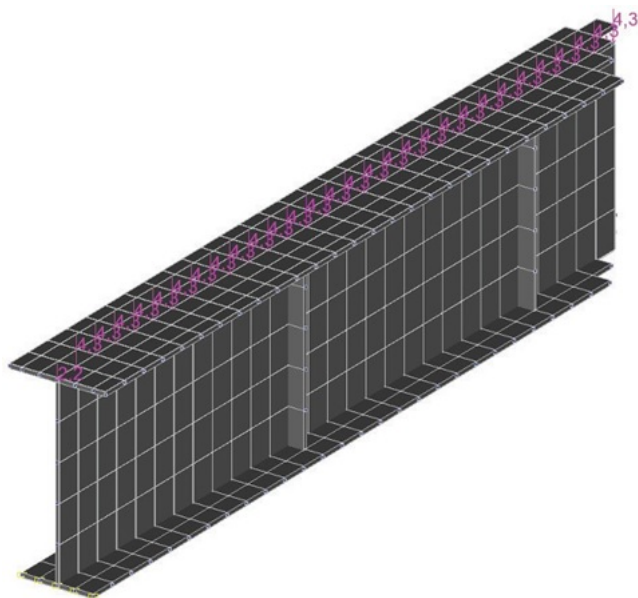


Рисунок 2 – Фрагмент розрахункової моделі балки у SCAD

Джерело: розроблено автором

Основні параметри метало-композитної балки, що розраховується: проліт – 11 м, висота перерізу – 675 мм, переріз сталевих стінок – 663 × 6 мм, переріз сталевих поясів – 260 × 11 мм, сталь марки С235, товщина композиту на основній площі – 1,5 мм, товщина композиту на поясах у найбільш навантажених зонах – 3 мм, переріз

композитних поперечних ребер – куточки 65×5 мм з кроком по довжині балки – 1,2 м, матеріал композиту – боро- пластик (щільність $\rho = 2000$ кг/м³, модуль пружності $E = 250$ ГПа, межа міцності при стисканні/розтягуванні/вигину $R = 60/1300/1750$ МПа [15]).

На рис. 3–5 наведено результати розрахунку металокомпозитної балки (деформації балки та поля основних напруг). За результатами розрахунків балки, посиленої композитом, вдалося зменшити товщини сталеві стінки та поясів при деякому збільшенні дотичних напруг у стінці, що не є критичним, враховуючи суттєвий запас напруг у стінці та забезпечену місцеву стійкість за рахунок ребер жорсткості.



Рисунок 3 – Деформована схема балки, мм

Джерело: розроблено автором

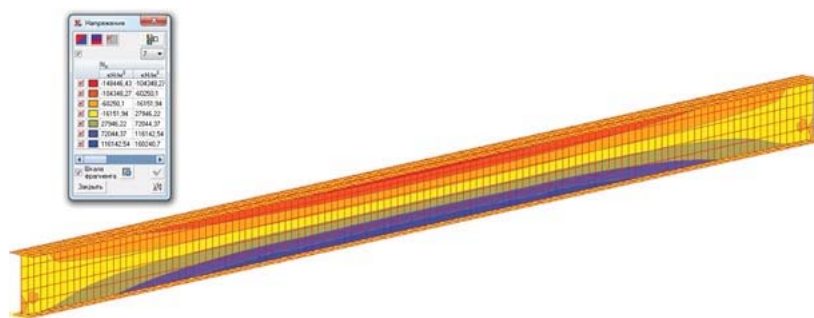


Рисунок 4 – Поля напруги в сталевій частині балки, КПа

Джерело: розроблено автором

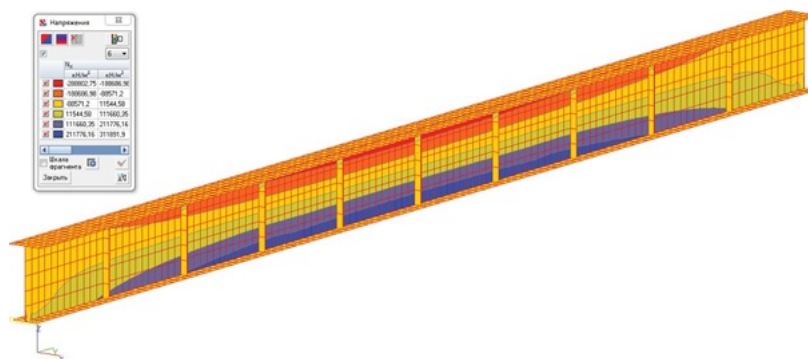


Рисунок 4 – Поля напруги в композитній частині балки

Джерело: розроблено автором

Встановлено, що металокомпозитна балка порівняно з металевою має нижчу вагу, різниця становить 31 % за економії сталі на 23 % та зниження експлуатаційних витрат.

Висновки:

1. Розроблено ряд несучих гібридних сталобетонних та металокомпозитних балкових конструкцій для перекриттів будівель та споруд, у тому числі на транспорті .

2. Запропоновано інноваційне конструктивне рішення металокомпозитної балки, запатентоване за участю автора. Виконано розрахунок балки за діючими методиками з використанням чисельних методів розрахунку.

3. Розглянутий варіант металокомпозитної балки дозволив зменшити товщину сталевих елементів балки, тим самим досягти зниження витрати сталі, як наслідок, її ваги. За попередньою економічною оцінкою вартість металокомпозитної балки буде дещо вищою за суттєвого збільшення її надійності та довговічності, а також зниження експлуатаційних витрат на відновлення захисного антикорозійного покриття.

4. Визначено ефективне конструктивне рішення балки, яке може бути раціонально до застосування в агресивних умовах експлуатації, а також при реконструкції та капітальному ремонті об'єкта за неможливості тимчасового ослаблення несучої конструкції.

Список літератури

1. Dragobetskii V., Shapoval A. Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. P. 363-368
2. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A.. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. P.52-60
3. Dragobetskii V., Zagimyak M., Naumova O., Shlyk S., Shapoval A. Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. P.92-99.
4. Vorobyov V., Pomazan M., Vorobyova L. Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern European journal of advanced technologies*. 2017. P.53-62.
5. Драгобецький В.Г., Кузев І.О., Молоштан Д.В. Морфологічний аналіз технологій ремонту кузовних і облицювальних деталей наземного вантажного транспорту. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2022. Вип. 1 (132) . С. 157-164.
6. Kuziev I., Maloshtan D. Method for calculation and selection of optimal modes of the explosion cladding of flat compositions. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. No 57/2021. P. 27-33.
7. Островерх Б.М. та ін. Чисельні дослідження напруженого стану та незворотних деформацій ґрунтових структур. *Будівельні конструкції. Механіка ґрунтів, геотехніка, фундаментобудування*. 2011. № 75, т. 2. С. 453-461.
8. Foti S. Geophysical Methods for Geotechnical Site Characterization. Surface Wave methods. Geo-Congress. Geo-Characterization and Modelling for Sustainability Short Course – 23rd of February 2014.
9. Demirdzic and S. Muzaferija. Numerical method for coupled fluid flow, heat transfer and stress analysis using unstructured moving meshes with cells of arbitrary topology. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1995. 125 (1-4). P. 235-255.
10. Cardiff Ph. Introduction to Solid Mechanics with OpenFOAM: Basic Training 2016. 111 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/305618769>.
11. Borecka A., Herzig J., Durjasz-Rybacka M.. Ground penetrating radar investigations of landslides. A case study in a landslide in radziszow. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2015. Vol. 37, No. 3. DOI: 10.1515/sgem-2015-0028.
12. Драгобецький В. В., Щетинін В. Т., Кузев І. О., Молоштан Д. М. Евристичні прийоми пошуку технічних рішень відновлення деталей з наноструктурних матеріалів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 2(121). С. 116–121. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.116-121.

13. Спосіб гнуття листових деталей : пат. 148165 Україна : МПК B21D 5/02 (2006.01) B21D 11/02 (2006.01). № у 2021 00439; заявл. 05.02.2021; опубл. 15.07.2021, Бюл. № 28.
14. Захисний шаруватий елемент : пат. 151090 Україна : МПК F41H5/04 (2006.01) F41H5/08 (2006.01). № у 2021 07716; заявл. 28.12.2021; опубл. 02.06.2022, Бюл. № 22.
15. Спосіб гнуття профільних заготовок : пат.151963 Україна : МПК B21D11/02 (2006.01). № у 2022 01537; заявл. 11.05.2022; опубл.06.10.2022, Бюл. № 40.

References

1. Dragobetskii, V. & Shapova, A. (2015). Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. P. 363-368 [in English].
2. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L. & Shapova, A. (2019). Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*. P.52-60 [in English].
3. Dragobetskii, V., Zagirnyak, M., Naumova, O., Shlyk, S. & Shapoval, A. (2018). Method of determination of technological durability of plastically deformed sheet parts of vehicles. *International Journal of Engineering and Technology*. P.92-99 [in English].
4. Vorobyov, V., Pomazan, M. & Vorobyova, L. (2017). Simulation of dynamic fracture of the borehole bottom taking into consideration stress concentrator. *Eastern European journal of advanced technologies*. P.53-62 [in English].
5. Dragobetsky, V.G., Kuzev, I.O. & Moloshtan, D.V. (2022). Morphological analysis of technologies for the repair of bodywork and facing parts of ground freight transport [Morphological analysis of technologies for the repair of bodywork and facing parts of ground freight transport]. *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug, Issue 1(132)*, 157-164 [in Ukrainian].
6. Kuziev, I. & Maloshtan, D. (2021). Method for calculation and selection of optimal modes of the explosion cladding of flat compositions. *Norwegian Journal of development of the International Science No 57*, P.27-33 [in English].
7. Ostroverkh B.M. et al. (2011). Chyselni doslidzhennia napruzhenoho stanu ta nezvorotnykh deformatsii gruntovykh struktur [Numerical studies of stress and irreversible deformations of soil structures]. *Stroitel'nye konstrukcii, 75, part 2*, 453-461 [in Ukrainian].
8. Foti, S. (2014). Geophysical Methods for Geotechnical Site Characterization. Surface Wave methods. Geo-Congress. Geo-Characterization and Modelling for Sustainability Short Course – 23rd of February 2014 [in English].
9. Demirdzic and S. Muzaferija. (1995). Numerical method for coupled fluid flow, heat transfer and stress analysis using unstructured moving meshes with cells of arbitrary topology. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 125 (1-4)*, p. 235-255 [in English].
10. Cardiff, Ph. (2016). Introduction to Solid Mechanics with OpenFOAM: Basic Training. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/305618769> [in English].
11. Borecka, A., Herzig, J. & Durjasz-Rybacka, M. (2015). Ground penetrating radar investigations of landslides. *A case study in a landslide in radziszow. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 37, No. 3*, DOI: 10.1515/sgem-2015-0028 [in English].
12. Dragobetskyi, V.V., Shchetynin, V.T., Kuzev, I.O. & Moloshtan, D.M. (2020). Evrystychni pryjomy poshuku tekhnichnykh rishen' vidnovlennia detalej z nanostukrurnykh materialiv [Heuristic techniques for finding technical solutions for the restoration of parts from nanostructured materials]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhajla Ostrohrads'koho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug. Vol. 2/ (121)*, 116–121. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.116-121 [in Ukrainian].
13. Pat. 148165 Ukraine: IPC B21D 5/02 (2006.01) B21D 11/02 (2006.01). Sposib hnuttia lystovykh detalej [The method of bending sheet parts]. No. u 2021 00439; statement February 05, 2021; published July 15, 2021, Bul. No. 28 [in Ukrainian].
14. Pat. 151090 Ukraine: IPC F41H5/04 (2006.01) F41H5/08 (2006.01). Zakhysnyj sharuvatyj element [Protective layered element]. No. u 2021 07716; statement December 28, 2021; published June 02, 2022, Bul. No. 22. [in Ukrainian].
15. Pat. 151963 Ukraine: IPC B21D11/02 (2006.01). Sposib hnuttia profil'nykh zahotovok [Method of bending profile blanks]. No. u 2022 01537; statement 11.05.2022; publ. 06.10.2022, Bull. No. 40 [in Ukrainian].

Ihor Kuziev, Senior Lecturer

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine

The Hybrid Structures of Beams on Transport Using Metal

To analyze the future use of hybrid and combined structures for floors of buildings and structures for civil and industrial purposes, including in transport, to expand the range of beam structures, to develop an innovative design solution for a hybrid beam with low material consumption with increased reliability and durability of the structure.

Analysis of the advantages of hybrid structures, materials used for their design, calculation of a metal-composite beam using existing engineering methods according to STO "Strengthening steel structures with composite materials. Design and production technology of works" and numerical methods of calculation with the involvement of calculation programs.

The advantages of hybrid and combined structures were revealed, a decrease in the material consumption of a metal-composite beam reinforced with boroplastic was revealed in comparison with a steel one. The proposed constructive solution of the beam can be used in floors and roofs of buildings and structures, transport facilities, especially in aggressive environments, as well as in the overhaul and reconstruction of industrial and civil facilities.

New developments of beams using steel concrete and composite materials for designed and reinforced structures are presented. An innovative design of a metal-composite beam was developed - a steel beam reinforced with an external reinforcement system made of a composite material, protected by a utility model patent, its static and structural calculation was performed using the SCAD computer complex, the stress-strain state was analyzed, an analysis was made of reducing the consumption of steel of a metal-composite beam and others. its advantages over traditional steel and reinforced concrete beam solutions.

construction, hybrid construction, floor beam, numerical calculation, reliability, durability

Одержано (Received) 08.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 17.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 656.1

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.243-249](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.243-249)

П.В. Попович, проф., д-р техн. наук

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

М.М. Маяк, проф., д-р техн. наук

Луцький національний технічний університет, Тернопіль, Україна

Р.І. Розум, доц., канд. техн. наук, **М.В. Буряк**, доц., канд. техн. наук, **К.М. Березька**, доц., канд. техн. наук, **Ю.Б. Коваль**, асп., **С.А. Мишко**, асп.

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

Дослідження стану транспортної інфраструктури міста Тернополя

Стаття присвячена проблемі дослідження стану транспортної інфраструктури міста Тернополя з метою подальшої розробки плану сталої міської мобільності для Тернопільської МТГ.

Аналіз виділення фінансування та освоєння коштів показав, що протягом тривалого часу відбувається недофінансування робіт пов'язаних з транспортною інфраструктурою м. Тернополя. Фактичні показники освоєння фінансових ресурсів виділених з бюджету громади на покращення стану ВДМ за 2020 рік не досягли планових показників на 36,4%. Згідно з даними з бюджету громади на реалізацію заходів Програми розвитку велосипедної інфраструктури міста на 2020 рік передбачалося виділення 2000,0 тис. грн, проте, фактично заходи не профінансовано.

транспортна інфраструктура, транспортна мережа, стала міська мобільність, вулично-дорожня мережа

© П.В. Попович, М.М. Маяк, Р.І. Розум, М.В. Буряк, К.М. Березька, Ю.Б. Коваль, С.А. Мишко, 2023

Постановка проблеми. Невід'ємною складовою сталого розвитку мобільності на території громади є забезпечення інклюзивної, зручної та безпечної для користування всіма категоріями населення транспортної інфраструктури. Утримання та оновлення мережі шляхів сполучення, об'єктів енергетичного господарства, технічних системи організації та управління роботою транспортного сектору, рухомого складу громадського транспорту та інших компонентів інфраструктури є передумовою забезпечення вищого рівня транспортного обслуговування та комфортного життя мешканців.

З точки зору сталого планування важливим критерієм при розробці довгострокових планів розвитку транспортної інфраструктури має застосовуватися комплексний підхід. Він має базуватися на принципах сталого розвитку, не обмежуючись лише забезпеченням функціонування транспортної системи в умовах існуючих природних чи штучних перешкод, як наприклад, річка Серет та залізничні колії, що зумовлюють планувальні обмеження для транспортного сполучення між частинами міста.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуюча ВДМ м. Тернополя є досить розгалуженою, однак сформована відповідно до традиційного підходу планування транспортних мереж, головною особливістю якого є розробка технічних та організаційних рішень щодо удосконалення організації дорожнього руху (будівництво, реконструкція, ремонт ділянок ВДМ та об'єктів дорожнього господарства) з метою забезпечення ефективної організації руху автомобільного транспорту.

ВДМ міста складається з 244 міських вулиць та доріг загальною протяжністю 209 км, 89% з яких мають задовільний стан асфальтобетонного покриття проїзної частини. Основну структуру вуличної мережі м. Тернополя складають магістральні вулиці загальноміського та районного значення, що забезпечують зв'язок між зовнішніми виходами з міста та центром, а також сполучають райони міста. У місті близько 40 % вулиць мають по одній смузї руху в напрямку, а також організована мережа вулиць одностороннього руху, що в зв'язку з містобудівними обмеженнями унеможливорює збільшення пропускну здатності об'єктів ВДМ шляхом розширення навіть в умовах зростаючого попиту на користування існуючою транспортною мережею.

Варто відзначити, що особливістю м. Тернополя також є наявність 17 штучних споруд, що є елементами магістральної ВДМ, з них:

- 6 автомобільних мостів загальною протяжністю 140,4 м;
- 9 шляхопроводів загальною протяжністю 1794 м;
- 2 пішохідних мости загальною протяжністю 242,2 м.

Якісна та зручна для користувачів ВДМ передбачає не лише належне утримання та ремонт об'єктів шляхово-мостового господарства, а й забезпечення будівництва та реконструкції магістральних вулиць, тротуарів, мостів, шляхопроводів через залізничні лінії, що потребує значного фінансування.

Постановка завдання. Провести дослідження стану транспортної інфраструктури міста Тернополя з метою подальшої розробки плану сталої міської мобільності для Тернопільської МТГ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Структура громадського транспорту Тернопільської МТГ представлена мережею тролейбусних маршрутів та автобусних маршрутів. Розташовані на маршрутній мережі міста 218 автобусних та 135 тролейбусних зупинок забезпечують достатньо високий рівень транспортної доступності в 500-метровій зоні від місця проживання 96% тернополян. Зупинковими спорудами облаштовані всі зупиночні пункти тролейбусних маршрутів, тоді як на

зупинках з низьким пасажирообміном залишаються необладнаними 17%. На автобусних маршрутах, що обслуговуються комунальним підприємством, функціонує 41 комфортабельний низькопідлоговий автобус, 20 з яких - нові. Проте 76% рухомого складу на автобусних маршрутах (131 од.) у приватній власності, що ускладнює контроль за оновленням та модернізацією транспортних засобів з урахуванням потреб маломобільних груп населення. Серед 60 тролейбусів на балансі КП «Тернопільелектротранс», 56 одиниць віком більше 15 років, середній вік парку рухомого складу електротранспорту складає 26 років, відповідно, тролейбусний парк потребує повного оновлення.

Для задоволення існуючих потреб пасажирів у якісному транспортному обслуговуванні необхідним є забезпечення достатньої кількості автобусів великої та середньої пасажиромісткості, однак, відповідно до принципів сталої міської мобільності, пріоритетом транспортної політики громади має бути екологічно чистий електричний транспорт.

Місто Тернопіль відзначилося пілотним впровадженням в Україні автоматизованої системи обліку оплати проїзду, забезпечивши також безготівкову систему оплати пристроями VISA/Mastercard/NFC як у комунальному, так і приватному транспорті. Понад 195 000 тернополян [1] забезпечені персоніфікованими та неперсоніфікованими картами, що дозволяють користуватися електронним квитком для оплати проїзду в міському пасажирському транспорті загального користування.

У різних мікрорайонах міста функціонують 56 авторизованих пунктів для поповнення відповідних карт. Також забезпечена можливість поповнення карти онлайн.

Для забезпечення можливості мешканцям придбати єдиний разовий квиток на проїзд за готівку за межами транспорту з 01.10.2021 функціонує 113 терміналів самообслуговування easura.

У місті Тернополі на 14 вулицях функціонують майданчики для паркування транспортних засобів [2]. Всього налічується 428 машино-місць, з них 399 для платного паркування. Встановлено 9 паркоматів.

У зв'язку зі зростанням рівня автомобілізації мешканців Тернопільської МТГ та відповідно зростаючим попитом на користування індивідуальним транспортом, найскладніша ситуація з недостатньою кількістю місць для паркування спостерігається в центральній частині міста, де зосереджена переважна більшість об'єктів тяжіння для здійснення поїздок.

Паркувальні інспектори не встигають контролювати порушення правил паркування і більшість узбіч вулиць зайнято запаркованими автомобілями, що в свою чергу перешкоджає вільному руху транспорту і пішоходів та підвищує ризики виникнення аварійних ситуацій. У центральній частині використовуються обмежувачі руху для унеможливлення паркування на тротуарах. Працює евакуатор на базі вантажного автомобіля MAN, вантажопідйомністю до 6т. для примусового переміщення автомобілів, які припарковані з загрозою безпеці дорожнього руху, чи на місцях призначених для паркування автомобілів людей з інвалідністю. Через нестачу фінансування, з місцевого бюджету не виділяються кошти на вдосконалення системи та порядку паркування. У першому півріччі 2021 проведено конкурс з визначення суб'єктів господарювання операторів паркування транспортних засобів в м. Тернополі/

У Тернополі лише 1,5% переміщень здійснюється з використанням велосипедного транспорту, що свідчить про те, що існуюча інфраструктура не відповідає попиту. Це, в першу чергу, пояснюється тим фактом, що більша частина користувачів велосипедного транспорту в Тернополі за відсутності виділених

велодоріжок здійснює переміщення по тротуару. Свідомо порушуючи діючі ПДР, що забороняють рух велосипедного транспорту по тротуарах, велосипедисти наражають на небезпеку пішоходів, тим самим знижуючи безпеку пересувань.

Найвні 8 кілометрів велосипедних смуг облаштовані за рахунок тротуару і позначені знаками суміжного руху пішоходів і велосипедистів. Не зважаючи на виділення велосипедної смуги кольором, такі знаки дають право велосипедистові рухатись по всьому тротуару, як і пішоходу. Це негативно впливає на привабливість велосипедної інфраструктури і наражає пішоходів на небезпеку.

У місті облаштовано близько 100 велопарковок, відсутній прокат велосипедів, натомість функціонують пункти прокату електросамокатів 3 провайдерів. Власники легкого електротранспорту використовують тротуари, велосмуги і проїзні частини на власний розсуд. Через значну різницю у швидкостях, пересуваючись тротуаром цей транспорт також створює небезпеку пішоходам. Стратегічним планом розвитку громади передбачається до 2029 року 100 км велошляхів та велосипедних контрсмуг громади та облаштування 2000 велосипедних паркомісць.

Пішохідна інфраструктура дружня для маломобільних груп тільки в центральній частині міста, за межами центру бракує понижень, а подекуди відсутні тротуари.. Вздовж деяких тротуарів пішохідні переходи не позначені або знаходяться дуже далеко від перехрестя. З міркувань безпеки пішохідний шлях не повинен розриватися розрізненими пішохідними переходами, що провокує пішоходів скорочувати шлях, створюючи аварійну ситуацію.

Проте, на розвиток пішохідної інфраструктури з місцевого бюджету щорічно виділяються кошти на реконструкцію тротуарів, влаштування та капітальний ремонт пішохідних доріжок, додаткове освітлення та влаштування нерегульованих пішохідних переходів, заміну покриття тротуарів фігурними елементами мощення.

У 2020 році номенклатура пішохідної інфраструктури в місті поповнилася новим об'єктом – надземним пішохідним переходом, що з'єднує Варшавський мікрорайон з парком Національного відродження та проспектом Степана Бандери. При будівництві враховані потреби маломобільних груп населення, міст обладнано двома ліфтами. Даний об'єкт був зведений за кошти будівельної компанії «Креатор-Буд», фінансування з міського бюджету не проводилося, що свідчить про високу ефективність державноприватного партнерства та стимулює залучення коштів приватних інвесторів в інфраструктуру соціального значення [3].

Забезпечення утримання, ремонту та оновлення об'єктів транспортної інфраструктури громади здійснюється відповідними виконавчими органами ТМР з використанням підходу щорічного планування фінансування необхідних заходів на основі затверджених галузевих програм. Проаналізовано планові та фактичні асигнування коштів на утримання та розвиток інфраструктури транспорту за останні 5 років на основі офіційних даних Тернопільської міської ради [4]. Зокрема, для даного аналізу було використано інформацію щодо фінансування програм реформування і розвитку житлово-комунального господарства, розвитку велосипедної інфраструктури, міського електричного та пасажирського транспорту, автоматизованої системи оплати проїзду та обліку пасажирів в наземному громадському транспорті. Варто зазначити, що не зважаючи на різні джерела фінансування, такі як міський бюджет, державний бюджет, інвестиції, кредити, кошти фізичних та юридичних осіб, реалізація заходів значною мірою залежить від коштів місцевого бюджету.

Таблиця 1 – Обсяги фінансування заходів транспортної інфраструктури в складі галузевих програм, тис. грн

	2018 р.			2019 р.			2020 р.		
	План	Факт	Відхилення	План	Факт	Відхилення	План	Факт	Відхилення
Покращення ВДМ	197314,7	113553,3	-83761,4	182010,0	165504,1	-16505,9	210620,0	133899,7	-76720,3
Підвищення безпеки на дорогах	8100,0	5379,1	-2720,9	8600,0	7702,7	-897,3	15500,0	5465,0	-10035,0
Розвиток системи ГТ	22190,9	10452,7	-11738,2	50443,4	23869,6	-26573,8	49915,6	30339,8	-19575,8
Розвиток вело. інфраструктури	1420,0	800,0	-620,0	0	0	0	2000,0	0	-2000,0

Джерело: [4]

Аналіз виділення фінансування та освоєння коштів (таблиця 1) показав, що протягом тривалого часу відбувається недофінансування робіт пов'язаних з транспортною інфраструктурою м. Тернополя. Так, зокрема, фактичні показники освоєння фінансових ресурсів виділених з бюджету громади на покращення стану ВДМ за 2020 рік не досягли планових показників на 36,4%. Проте на реконструкцію шляхопроводу через залізничну колію на вул. Об'їзна було виділено також кошти з державного бюджету в загальній сумі 118538,13 тис. грн. Згідно з даними з бюджету громади на реалізацію заходів Програми розвитку велосипедної інфраструктури міста на 2020 рік передбачалося виділення 2000,0 тис. грн, проте, фактично заходи не профінансовано. Фактичні показники освоєння фінансових ресурсів виділених з бюджету громади на підвищення безпеки на дорогах за 2020 рік не досягли планових показників на 64,7%. Це зумовлено відсутністю фактичних асигнувань на розмітку та влаштування обмежувачів руху, що були передбачені програмою. Фактичні показники освоєння фінансових ресурсів виділених з бюджету громади на розвиток системи ГТ за 2020 рік не досягли планових показників на 39,2%. Було відсутнє фінансування на придбання б/к тролейбусів, капітальний ремонт РС та забезпечення інфраструктури для обслуговування парку РС.

Висновки. Підсумовуючи виявлені проблеми можна зробити висновок, що забезпечення утримання, ремонту та оновлення об'єктів транспортної інфраструктури громади здійснюється відповідними виконавчими органами ТМР з використанням підходу щорічного планування фінансування необхідних заходів на основі затверджених галузевих програм. Варто зазначити, що не зважаючи на різні джерела фінансування, такі як міський бюджет, державний бюджет, інвестиції, кредити, кошти фізичних та юридичних осіб, реалізація заходів значною мірою залежить від коштів місцевого бюджету. Аналіз виділення фінансування та освоєння коштів показав, що протягом тривалого часу відбувається недофінансування робіт пов'язаних з транспортною інфраструктурою м. Тернополя.

Список літератури

1. Разовий квиток для проїзду у громадському транспорті Тернополя з 1 жовтня можна буде придбати через 113 терміналів самообслуговування. *Тернопільська міська рада. Офіційний сайт*: веб-сайт. URL: <https://ternopilcity.gov.ua/news/52999.html> (дата звернення: 01.04.2023)
2. Інформація про паркування у Тернополі. *Тернопільська міська рада. Офіційний сайт*: веб-сайт. URL: <https://ternopilcity.gov.ua/poslugi-ta-mayno-gromadi/parkuvannya/> (дата звернення: 01.04.2023)
3. Новий сучасний пішохідний міст відкрили у Тернополі поблизу Збараського кільця. *Тернопільська міська рада. Офіційний сайт*: веб-сайт. URL: <https://ternopilcity.gov.ua/news/43958.html> (дата звернення: 01.04.2023)
4. Галузеві програми. *Тернопільська міська рада. Офіційний сайт*: веб-сайт. URL: <https://ternopilcity.gov.ua/strategichni-ta-programni-dokumenty/galuzevi-programy/> (дата звернення: 03.04.2023)
5. Мигаль Г. В., Протасенко О. Ф.. Безпека та організація дорожнього руху [Електронний ресурс] : навч. посіб. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків авіац. ін-т», 2021. 85 с.
6. Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів / М.В. Буряк та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Т. 15, № 1 С. 17–22
7. Кашканов А.А., Кужель В.П. Організація дорожнього руху : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 125 с.
8. Логістична інфраструктура Тернопільської області / Н.М. Фалович та ін. *Центральноукраїнськ кий науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип.5(36), ч. II. С. 274-283.
9. Поліщук В.П. Організація та регулювання дорожнього руху: підр. ; за заг. ред. В.П. Поліщука; О.О. Бакуліч, О.П. Дзюба, В.І. Єресов, О.В. Красільнікова, О.В. Христенко. К.: Знання України, 2012. 467 с.
10. Рейцен Є.О. Організація і безпека міського руху: навч. посіб. К.: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2014. 454 с.
11. Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 19 листопада 2021 року). Кривий Ріг, 2021. 238 с.
12. Експлуатаційна надійність видів громадського транспорту міста Тернополя. / Н.М. Фалович та ін.. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. №1 (18). С. 186 – 191.

Reference

1. Razovij kvytok dlia proizdu u hromads'komu transporti Ternopolia z 1 zhovtnia mozhna bude prydbaty cherez 113 terminaliv samoobsluhovuvannia [From October 1, a one-time ticket for public transport in Ternopil can be purchased through 113 self-service terminals.]. *ternopilcity.gov.ua*. Retrieved from <https://ternopilcity.gov.ua/news/52999.html>
2. Informatsiia pro parkuvannia u Ternopoli [Information about parking in Ternopil.]. *ternopilcity.gov.ua*. Retrieved from <https://ternopilcity.gov.ua/poslugi-ta-mayno-gromadi/parkuvannya/>
3. Novyj suchasnyj pishokhidnyj mist vidkryly u Ternopoli poblyzu Zbaraz'koho kil'tsia [A new modern pedestrian bridge was opened in Ternopil near the Zbaraz ring.]. *ternopilcity.gov.ua*. Retrieved from <https://ternopilcity.gov.ua/news/43958.html>
4. 4. Haluzevi prohramy [Branch programs].*ternopilcity.gov.ua* .Retrieved from <https://ternopilcity.gov.ua/strategichni-ta-programni-dokumenty/galuzevi-programy/>Myhal, H.V. & Protasenko, O.F. (2021). *Bezpeka ta orhanizatsiia dorozhnoho rukhu* [Traffic safety and organization] Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t» [in Ukrainian].
5. Myhal', H.V. & Protasenko, O.F. (2021). *Bezpeka ta orhanizatsiia dorozhn'oho rukhu* [Traffic safety and organization] . Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t»
6. Buriak, M.V., Rozum, R.I., Falovych, N.M., Prohni, P.B., Popovych, P.V., Shevchuk, O.S. & Antoniuk, O.P. (2022). Otsinka mitsnosti ta nadiinosti avtotransportnykh zasobiv [Evaluation of the durability and reliability of motor vehicles] . *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport, Vol. 15, 1*, 17–22 [in Ukrainian].
7. Kashkanov, A.A. & Kuzhel, V.P. (2017). *Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu* [Organization of traffic]. Vinnytsia : VNTU [in Ukrainian].
8. Falovych, N.M., Falovych, V.A., Shevchuk, O.S., Popovych, P.V., Prohni, P.B. & Melnychenko, V.V. (2022). Lohistychna infrastruktura Ternopilskoi oblasti [Logistics infrastructure of Ternopil region] . *Tsentrlnoukrains kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauk – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Issue.5(36), part. II*, S. 274-283 [in Ukrainian].

9. Polishchuk, V.P. (2012). *Orhanizatsiia ta rehulivannia dorozhnoho rukhu [Organization and regulation of road traffic]*. V.P. Polishchuka; O.O. Bakulich, O.P. Dziuba, V.I. Yeresov, O.V. Krasilnikova, O.V. Khrystenko (Eds.). Kyiv: Znannia Ukrainy [in Ukrainian].
10. Reitsen, Ye.O. (2014). *Orhanizatsiia i bezpeka miskoho rukhu: navchalnyi posibnyk [Organization and safety of city traffic]*. Kyiv: TOV «SIK HRUP Ukraina», [in Ukrainian].
11. Transportna bezpeka: pravovi ta orhanizatsiini aspekty [Transport safety: legal and organizational aspects]: *XVI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsia, (m. Kryvyi Rih, 19 lystopada 2021 roku) - XVI International scientific and practical conference* (238 p.). Kryvyi Rih [in Ukrainian].
12. Falovych, N.M., Shevchuk, O.S., Popovych, D.P., Popovych, P.V., Buriak, M.V., Rozum, R.I. & Chorna, O.V. (2022). Ekspluatatsiina nadiinist vydiv hromadskoho transportu mista Ternopolia [Operational reliability of types of public transport in the city of Ternopil]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport, 1 (18)*, 186 – 191 [in Ukrainian].

Pavlo Popovych, Prof., DSc.

Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Mykola Maiiak, Prof., DSc.

Lutsk National Technical University, Ternopil, Ukraine

Ruslan Rozum, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Buryak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kateryna Berezka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yurii Koval**, post graduate, **Serhii Myshko**, post graduate

Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Study of the State of Transport Infrastructure of the City of Ternopil

The article is devoted to the problem of researching the state of the transport infrastructure of the city of Ternopil with the aim of further developing a sustainable urban mobility plan for the Ternopil urban territorial community.

In order to meet the existing needs of passengers in quality transport service, it is necessary to provide a sufficient number of buses with a large and medium passenger capacity, however, in accordance with the principles of sustainable urban mobility, the priority of the community's transport policy should be environmentally friendly electric transport. In connection with the growing level of motorization of residents of the Ternopil urban territorial community and the correspondingly growing demand for the use of individual transport, the most difficult situation with an insufficient number of parking spaces is observed in the central part of the city, where the vast majority of objects of attraction for making trips are concentrated. Maintenance, repair and renewal of community transport infrastructure facilities is carried out by the relevant executive bodies of the TCC using the approach of annual planning of financing the necessary measures based on approved industry programs. Regardless of various sources of funding, such as the city budget, the state budget, investments, loans, funds of individuals and legal entities, the implementation of measures largely depends on the funds of the local budget.

The analysis of the allocation of funding and the utilization of funds showed that for a long time there has been underfunding of works related to the transport infrastructure of the city of Ternopil. The actual indicators of utilization of financial resources allocated from the community budget for improving the condition of the street and road network for 2020 did not reach the planned indicators by 36,4%. According to the data from the community budget, 2000.000,0 UAH was supposed to be allocated for the implementation of the measures of the City Bicycle Infrastructure Development Program for 2020, however, in fact, the measures have not been financed.

transport infrastructure, transport network, permanent urban mobility, street and road network

Одержано (Received) 27.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 03.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

УДК 656.1

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.250-256](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.250-256)

П.В. Попович, проф., д-р техн. наук, **Р.І. Розум**, доц., канд. техн. наук
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

І.С. Мурований, доц., канд. техн. наук

Луцький національний технічний університет, Тернопіль, Україна

М.В. Буряк, доц., канд. техн. наук, **К.М. Березька**, доц., канд. техн. наук,

Н.А. Петринюк, асп., **І.О. Лоїк**, асп.

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна

Дослідження безпеки дорожнього руху у м. Тернополі

Стаття присвячена проблемі дослідження проблематики безпеки дорожнього руху в місті Тернополі з структуруванням встановлених фактичних недоліків за основними показниками. У результаті проведеного аналізу руху транспортних потоків у ранковий період встановлено найбільш проблемні ділянки ВДМ.

дорожньо-транспортна пригода, транспортна інфраструктура, транспортна мережа, стала міська мобільність, безпека дорожнього руху, вулично-дорожня мережа

Постановка проблеми. Важливим напрямком сталого розвитку мобільності є забезпечення безпеки дорожнього руху для всіх його учасників. Розробка та реалізація організаційних заходів і технічних рішень, що дозволяють знизити аварійність на дорогах є передумовою створення безпечного середовища для переміщень усіх категорій населення.

Проведення якісного аналізу наявних недоліків у даній галузі засноване на детальному аналізі звітних статистичних даних по кількості дорожньо-транспортних пригод за типом, місцями, причинами їх виникнення, тощо. Даний підхід дозволяє комплексно оцінити наявні проблеми міста і визначити дієві методи їх вирішення з метою зниження аварійності та кількості жертв, що постраждали.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз поточного стану безпеки руху базується на даних щодо зареєстрованих ДТП у 2018 - 2020 рр з Єдиної інформаційної системи Міністерства внутрішніх справ України (ЄІС МВС), системи ІПС «АРМОР», наданих відділом безпеки дорожнього руху управління патрульної поліції в Тернопільській області.

Постановка завдання. Провести дослідження стану безпеки дорожнього руху в місті Тернополі з метою подальшої розробки плану сталої міської мобільності для Тернопільської МТГ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Надання транспортних послуг із перевезення пасажирів рухомим складом електротранспорту в м. Тернополі здійснюється КП «Тернопільелектротранс», а також приватними підприємцями, згідно одержаних дозвільних документів.

Для статистичного аналізу дорожньо-транспортної аварійності та травматизму в європейській практиці та в Україні використовуються ключові індикатори, які мають найбільшу важливість з точки зору управління безпекою дорожнього руху, що представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Ключові індикатори, які мають найбільшу важливість з точки зору управління безпекою дорожнього руху

Показник	2018 р.	2019 р.	2020 р.
Загальна кількість ДТП	1133	1179	1276
Загальна кількість постраждалих	2326	2379	2546
у т.ч. – без ушкоджень	2139	2122	2301
легко травмованих	149	218	185
помер на місці ДТП	4	12	2
помер по дорозі в лікарню	1	1	2
помер в лікарні протягом 30 днів	4	4	4
важко травмований	29	22	52

Джерело: розроблено авторами

Дані засвідчують загальну тенденцію до погіршення ситуації з дорожньо-транспортним травматизмом.

У країнах з високим рівнем розвитку управління безпекою дорожнього руху, зокрема, у країнах Європейського Союзу, економічні втрати від дорожнього травматизму і смертності оцінюються в грошовому еквіваленті. Для цього застосовуються офіційно визнані наукові оцінки статистичної вартості життя (Statistical Value of Life). Ці показники, зокрема, використовуються для оцінки економічної ефективності заходів у сфері безпеки доріг (Cost-Benefit Analysis). В Україні такі інструменти оцінки на сьогодні не застосовуються, офіційно визнаного показника вартості життя не існує.

Для оцінки економічних витрат в Україні рекомендовано використовувати спрощену методику, згідно з якою 1 смертельний випадок може бути умовно “оцінено” ваговим коефіцієнтом 70-ти показників валового внутрішнього продукту на душу населення, а 1 випадок травмування – як 17-ти показників валового внутрішнього продукту на душу населення (табл. 2).

Таблиця 2 – Економічні втрати від дорожніх аварій, що сталися на території Тернополя за 2020 рік

Категорія	Випадки, од	ВВП на душу населення, грн	Коефіцієнт, рекомендований Світовим банком	Оціночна сума економічних втрат, грн
Загиблі	8	100432,5	70	56242200,0
Травмовані	237	100432,5	17	404642542,5
ВСЬОГО				460884742,5

Джерело: розроблено авторами

Економічні втрати від дорожніх аварій, що сталися на території Тернополя за 2020 рік, можна оцінити приблизно в приблизно 460,9 млн грн, або в сумі 2031,22 грн у розрахунку на одного мешканця Тернопільської МТГ.

За результатами аналізу ДТП за період 2018-2020 років (табл. 3) встановлено, що 40,2 % всіх загиблих чи травмованих у ДТП в місті Тернополі становлять вразливі користувачі доріг, які не користувалися безпосередньо автомобілем, а здійснювали переміщення пішки або на велосипеді.

Таблиця 3 – Аналіз ДТП за період 2018-2020 рр.

Категорія користувачів доріг	2018				2019				2020				Всього, частка		
	Загиблих		Травмованих		Загиблих		Травмованих		Загиблих		Травмованих		Загиблих	Травмованих	Учасників ДТП
	Осіб	%	Осіб	%	Осіб	%	Осіб	%	Осіб	%	Осіб	%			
Користувачі моторизованого транспорту	3	1,6	113	60,4	9	3,5	152	59,1	2	0,8	133	54,4	41,2	60,8	59,8
Пішоходи	6	3,2	60	32,1	8	3,1	81	31,6	6	2,4	93	37,9	58,8	35,7	36,9
Велосипедисти	-	-	5	2,7	-	-	7	2,7	-	-	11	4,5	0,0	3,5	3,3

Джерело: розроблено авторами

Частка пішоходів серед усіх загиблих в ДТП осіб складає 58,8 %, а їхня частка серед травмованих становить 35,7%.

Частка велосипедистів серед травмованих у ДТП становить всього 3,5 %, проте, досить низький показник травматизму обумовлений невеликою кількістю користувачів велосипедного транспорту, що в свою чергу, зумовлено низьким рівнем безпеки та інфраструктурного забезпечення для заохочення до користування велосипедом.

Автомобілісти, включно з водіями, пасажирями автомобілів, громадського транспорту та мотоциклістами, складають 41,2 % від усіх загиблих та 60,8 % від усіх травмованих у результаті ДТП.

На основі даних відділу безпеки дорожнього руху управління патрульної поліції в Тернопільській області про кількість та причини скоєння ДТП за період 2018 – 2020 рр. встановлено, що найбільша кількість ДТП на досліджуваній території відбувалися через:

- Порушення правил маневрування;
- Недотримання дистанції;
- Порушення правил проїзду перехресть.

Це свідчить про наявність проблем організації руху на перехрестях, що зумовлюють багатоваріантність траєкторій проїзду та підвищують кількість ДТП за участю кількох транспортних засобів під час здійснення маневрування.

З метою проведення аналізу безпеки дорожнього руху в м. Тернополі було застосовано картографічний метод, що передбачає накладання на мапу масивів даних щодо статистики ДТП за 2018-2020 роки (рис. 1). Даний підхід дозволяє визначити місця концентрації ДТП, однак в ході аналізу було виявлено, що ДТП в Тернополі стаються здебільшого вздовж головних вулиць без чітко визначених місць концентрації. У зв'язку з цим було виведено умовний показник небезпечності транспортних коридорів Тернополя, що визначається співвідношенням кількості ДТП з потерпілими до загальної протяжності вулиці, що також дозволяє проаналізувати переважне розташування (кластеризацію) ДТП з потерпілими в кожному районі міста.



Рисунок 1 – Локації концентрації ДТП

Джерело: розроблено авторами

У ході дослідження 15 перехресть на ВДМ м. Тернополя було виявлено неефективні проектувальні рішення та недостатньо раціональну організацію дорожнього руху, що спричиняють підвищення ризиків виникнення ДТП. Виявлено наступні інфраструктурні недоліки, пов'язані з безпекою на дорогах:

- На досліджуваних перехрестях було визначено кількість точок пересічення транспортних потоків, які мають найбільший вплив на оцінку ступеню безпеки перехрестя: вул. Київська – В. Великого – 8; вул. Замкова – Руська – 8; вул. Б. Хмельницького – Руська – 2; вул. Бережанська – Львівська – Мазепи – Кривоноса – 15; вул. Бантери – Коновальця – 16; вул. 15 Квітня – Злуки – 2; вул. Татарська – Дівоча – 1; вул. Замкова – Руська - 12.

- Занадто велика площа окремих перехресть, нечітка розмітка і завеликі радіуси поворотів, що призводить до помилок при обранні водіями швидкості та траєкторії руху на перехресті, дезорієнтації водіїв, хаотичності та невпорядкованості руху.

- Відсутня розмітка на окремих перехрестях та в безпосередній близькості до них, відсутні пішохідні переходи на деяких перехрестях.

- Виявлено випадки невідповідності розташування острівців безпеки геометричним параметрам поперечного профілю проїжджої частини, наприклад, на вул. Тарнавського

Непомітність пішохідного переходу та людей на ньому є одним зі значних факторів ризику, що призводить до ДТП двох типів: наїзд на пішохода та зіткнення ззаду під час того, як водій автомобіля зупиняється для надання пріоритету пішоходам. В умовах стандартного вуличного освітлення пішохідні переходи не є достатньо помітними, і водії під час руху не знижують швидкість. З метою підвищення безпеки пішоходів у м. Тернополі застосовується контрастне точкове освітлення пішохідних переходів, що є позитивною характеристикою міста, проте виявлено, що воно присутнє не в повній мірі на кожному пішохідному переході

Дорожня розмітка та знаки є ключовими інфраструктурними чинниками безпеки, адже дані засоби організації руху повинні інформувати водіїв, велосипедистів і пішоходів про правила руху, необхідну траєкторію та швидкість руху, складні ділянки та фактори небезпеки на дорозі. У Тернополі були виявлені наступні невідповідності:

- По периметру знаків відсутні подвійні згини для забезпечення жорсткості, знаки мають погнуту поверхню;
- Кріплення здійснено з наскрізними отворами в робочій поверхні знаку;
- Елементи кріплення не утримують знаки надійно, мають місце ознаки окислення;
- Кольори плівки втратили яскравість, мають відшарування та тріщини

Технічна невідповідність дорожніх знаків призводить до передчасної втрати важливих для безпеки характеристик, зокрема, світлоповертальних властивостей, візуальної та фізичної цілісності знаків, контрастності, внаслідок чого вони не виконують свою функцію, можуть бути непомітними для водіїв і потребують частішої заміни.

Відмова від користування ременями безпеки є одним із найбільших факторів ризику на дорогах України. Міжнародними дослідженнями доведено, що використання ременя безпеки знижує ризики травмування та летальних випадків на понад 50%. Однак переважна більшість автомобілістів нехтує Правилами дорожнього руху, що є однією з причин підвищеного травматизму під час ДТП. За статистикою, 60,8% травмованих у ДТП в м. Тернополі становлять водії та пасажирів автомобілів, тому проведення інформаційних кампаній та підвищення рівня контролю за користуванням ременями безпеки сприятиме зменшенню тяжкості наслідків, кількості травмованих і загиблих.

Висока швидкість руху транспортних засобів на вулицях міст і сіл є негативним явищем, що безпосередньо впливає на безпеку руху. По-перше, вона призводить до збільшення ймовірності виникнення ДТП, оскільки водії мають менше часу, щоб помітити зміни в дорожній обстановці та зреагувати на них, окрім того, гальмівний шлях автомобіля збільшується разом зі зростанням швидкості. По-друге, за таких умов руху тяжкість наслідків збільшується – зростає тяжкість травм та ймовірність смертельних наслідків. За даними ВООЗ, в аварії, яка сталася на швидкості 80 км/год, шанси вижити в пішохода чи велосипедиста становлять менше 5%³⁸. Для приведення Правил дорожнього руху України до Європейських норм та забезпечення безпеки всіх учасників руху, було встановлено обмеження швидкості в населених пунктах на рівні 50 км/год. Проблема надмірної швидкості в Тернополі, як і в багатьох інших містах України пов'язана з наявністю довгих прямих ділянок вулиць, на яких немає потреби змінювати траєкторію руху, відсутністю світлофорних та інших об'єктів штучного зниження швидкості, кільцевих перехресть; наявністю надмірно широких смуг руху (понад 3 м.).

Поширеною проблемою у містах є нестача паркувальних місць та недоліки в організації існуючих. У зв'язку з цим, водії залишають транспортні засоби в заборонених Правилами дорожнього руху місцях – у безпосередній близькості до перехресть та пішохідних переходів, на крайній правій смузі, у зоні дії знаків «Стоянка заборонена» або відповідної дорожньої розмітки. Подібні порушення зменшують оглядовість, підвищує ймовірність зіткнень і наїздів на пішоходів, знижує пропускну спроможність ділянок ВДМ та перехресть. Різні способи постановки автомобілів на паркувальних місцях та їх повернення на смуги з «кишені» викликають конфліктні ситуації, що також вносить незручності іншим учасникам руху та ускладнює проїзд внаслідок неупорядкованості паркомісць та нестачі простору для здійснення маневрів.

Висновки. Підсумовуючи виявлені проблеми можна зробити висновок, що чинна політика і практики Тернополя у сфері менеджменту безпеки дорожнього руху потребують вдосконалення. У місті регулярно проводяться ремонтні роботи з утримання проїжджої частини та технічних засобів у належному стані, однак як якість, обсяги виконуваних робіт не в повній мірі покривають потребу в забезпеченні безпеки руху та інформаційному забезпеченні учасників руху. Загалом можна констатувати, що Тернопіль – це місто, яке тільки розпочинає проактивні дії у сфері забезпечення

безпеки руху (“starting city”). У цьому воно вигідно відрізняється від переважної більшості інших обласних центрів, в яких поки що проблема безпеки руху навіть не обговорюється, та розглядом даного питання у ПСММ Тернопільської міської територіальної громади.

Список літератури

1. Закон України «Про автомобільні дороги» зі змінами 2021 рік №2862-IV від 09.08.2005, редакція від 10.16.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15#Text> (дата звернення: 06.04.2023).
2. ДБН 360-92**. Державні будівельні норми . Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень . К. : Держбуд України, 2002. 142 с.
3. ДБН В.2.3-5-2001: Державні будівельні норми . Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів. К.: Держбуд України, 2001. 50 с.
4. ДСТУ 4100-2002. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування . К.: Держбуд України, 2002. 115 с.
5. Безпека та організація дорожнього руху [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. В. Мигаль, О. Ф. Протасенко. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2021. 85 с.
6. Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів / М.В. Буряк та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Т. 15, № 1 С. 17–22
7. Кашканов А.А., Кужель В.П. Організація дорожнього руху : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 125 с.
8. Логістична інфраструктура Тернопільської області / Н.М. Фалович та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип.5(36), ч. II. С. 274-283.
9. Поліщук В.П. Організація та регулювання дорожнього руху: підр. ; за заг. ред. В.П. Поліщука; О.О. Бакуліч, О.П. Дзюба, В.І. Єресов, О.В. Красільнікова, О.В. Христенко. К.: Знання України, 2012. 467 с.
10. Рейцен Є.О. Організація і безпека міського руху: навч. посіб. К.: ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2014. 454 с.
11. Експлуатаційна надійність і роботоздатність вантажного автомобільного рухомого складу / Р.І.Розум та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022 . Том 26 №5(36). С. 201-205
12. Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції (в авторській редакції), (м. Кривий Ріг, 19 листопада 2021 року). Кривий Ріг, 2021. 238 с.
13. Експлуатаційна надійність видів громадського транспорту міста Тернополя. / Н.М. Фалович та ін.. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. №1 (18). С. 186 – 191.

Reference

1. Zakon Ukrainy «Pro avtomobilni dorohy» zi zminamy 2021 rik №2862-IV vid 09.08.2005 [Law of Ukraine "On Motorways" as amended in 2021 No. 2862-IV dated 09.08.2005, edition dated 10.16.2020]. (n.d.). redaktsiia vid 10.16.2020. zakon.rada.gov.ua. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15#Text>
2. Derzhavni budivelni normy / Mistobuduvannia. Planuvannia i zabudova miskykh i silskykh poselen [State building regulations. Town planning. Planning and construction of urban and rural settlements]. (2002). DBN 360-92. Kyiv: Derzhbud Ukrainy
3. Derzhavni budivelni normy . Sporudy transportu. Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv [State building regulations . Transport structures. Streets and roads of settlements]. (2001). DBN V.2.3-5-2001. Kyiv : Derzhbud Ukrainy
4. Znaky dorozhni. Zahalni tekhichni umovy. Pravyla zastosuvannia [Road signs. General technical conditions. Application rules] . (2002). DSTU 4100-2002. Kyiv : Derzhbud Ukrainy
5. Myhal, H.V. & Protasenko, O.F. (2021). *Bezpeka ta orhanizatsiia dorozhnoho rukhu [Traffic safety and organization]* Kharkiv : Nats. aerokosm. un-t im. M. Ye. Zhukovskoho «Kharkiv. aviats. in-t» [in Ukrainian].
6. Buriak, M.V., Rozum, R.I., Falovych, N.M., Prohni, P.B., Popovych, P.V., Shevchuk, O.S. & Antoniuk, O.P. (2022). Otsinka mitsnosti ta nadiinosti avtotransportnykh zasobiv [Evaluation of the durability and reliability of motor vehicles] . *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, Vol. 15, 1, 17–22 [in Ukrainian].
7. Kashkanov, A.A. & Kuzhel, V.P. (2017). *Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu [Organization of traffic]*. Vinnytsia : VNTU [in Ukrainian].

8. Falovych, N.M., Falovych, V.A., Shevchuk, O.S., Popovych, P.V., Prohni, P.B. & Melnychenko, V.V. (2022). Lohistychna infrastruktura Ternopilskoi oblasti [Logistics infrastructure of Ternopil region] . *Tsentrlnoukrains kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauk – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Issue.5(36), part. II*, S. 274-283 [in Ukrainian].
9. Polishchuk, V.P. (2012). *Orhanizatsiia ta rehuliuвання dorozhnoho rukhu [Organization and regulation of road traffic]*. V.P. Polishchuka; O.O. Bakulich, O.P. Dziuba, V.I. Yeresov, O.V. Krasilnikova, O.V. Khrystenko (Eds.). Kyiv: Znannia Ukrainy [in Ukrainian].
10. Reitsen, Ye.O. (2014). *Orhanizatsiia i bezpeka miskoho rukhu: navchalnyi posibnyk [Organization and safety of city traffic]*. Kyiv: TOV «SIK HRUP Ukraina», [in Ukrainian].
11. Rozum, R.I., Buriak, M.V., Prohni, P.B., Falovych, N.M., Shevchuk, O.S., Popovych, P.V. & Zakharchuk, O.P. (2022). Eksploatatsiina nadiinist i robotozdatnist vantazhnoho avtomobilnoho rukhomoho skladu [Operational reliability and efficiency of freight automobile rolling stock]. *Tsentrlnoukrains kyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences , Issue 5(36), part. 2* , 201-205 [in Ukrainian].
12. Transportna bezpeka: pravovi ta orhanizatsiini aspekty [Transport safety: legal and organizational aspects]: *XVI Mizhnarodna nauково-praktychna konferentsia, (m. Kryvyi Rih, 19 lystopada 2021 roku) - XVI International scientific and practical conference* (238 p.). Kryvyi Rih [in Ukrainian].
13. Falovych, N.M., Shevchuk, O.S., Popovych, D.P., Popovych, P.V., Buriak, M.V., Rozum, R.I. & Chorna, O.V. (2022). Eksploatatsiina nadiinist vydiv hromadskoho transportu mista Ternopolia [Operational reliability of types of public transport in the city of Ternopil]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport, 1 (18)*, 186 – 191 [in Ukrainian].

Pavlo Popovych, Prof., DSc., **Ruslan Rozum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Ihor Murovanyi, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Lutsk National Technical University, Ternopil, Ukraine

Mykola Buryak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kateryna Berezka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliya**

Petrynyuk, post-graduate, **Ihor Loik**, post-graduate

Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

Road Traffic Safety Research in Ternopol

The article is devoted to the problem of researching road safety issues in the city of Ternopil with the structuring of established actual deficiencies according to the main indicators.

As a result of the analysis of traffic flows in the morning period, the most problematic sections of the street and road network were identified. In general, it is observed that in the evening peak period, the speed of traffic flows on the street and road network is significantly lower than in the morning peak period. In order to analyze road traffic safety in the city of Ternopil, a cartographic method was used, which involves superimposing on the map data arrays regarding traffic accident statistics for 2018-2020. This approach makes it possible to determine the places of concentration of road accidents, however, during the analysis, it was found that road accidents in Ternopil mostly occur along the main streets without clearly defined places of concentration. In this regard, a conditional indicator of the danger of transport corridors of Ternopil was derived, which is determined by the ratio of the number of road accidents with victims to the total length of the street, which also allows analyzing the predominant location (clustering) of road accidents with victims in each district of the city.

The current policy and practices of Ternopil in the field of road safety management need improvement. In the city, repair work is regularly carried out to maintain the roadway and technical equipment in proper condition, but the quality and volume of the work performed do not fully cover the need to ensure traffic safety and provide information to road users. In general, it can be stated that Ternopil is a city that is just starting proactive actions in the field of traffic safety ("starting city"). In this, it favorably differs from the vast majority of other regional centers, in which the problem of traffic safety is not even discussed so far, and consideration of this issue in terms of sustainable urban mobility of the Ternopil urban territorial community.

traffic accident, transport infrastructure, transport network, permanent urban mobility, road safety, street and road network

Одержано (Received) 27.04.2023

Прорецензовано (Reviewed) 03.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

Natalia Rozhko, Prof., DSc., **Oleg Tson**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Uliana Plekan**, PhD econ. sci., **Anatolii Matviishyn**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Bogdan Gevko**, PhD econ. sci.
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine
e-mail: tson_oleg_@ukr.net

The use of network intralogistics and fulfillment for the functioning of transport and warehouse complexes

This article examines the peculiarities of the functioning of transport and warehouse complexes, taking into account the changes and challenges that arose as a result of both the spread of the Covid -19 pandemic and the conditions of martial law. The key factors on which the formation of competitive advantages of transport and warehouse complexes in unstable economic systems depends are revealed.

The reasons for the existence of the controversy regarding the interpretation of the concept of intralogistics and fulfillment network in modern challenges and they have been established that network intralogistics is a system concept, where many complex algorithms and components are interconnected and closely interact, and thus, based on practically oriented technical principles - the technological part of intralogistics should be properly integrated with fulfillment processes, which include a system algorithm of actions from the very beginning of receiving an order from the buyer until the purchase is received, that is, the sphere of relations, in which strategic system principles and their implementation with a system concept of interconnection: logistics and service acquire key importance.

intralogistics, fulfillment, transport and logistics support, digital technologies, e-commerce transport and logistics infrastructure, customer service

Introduction. A full recovery of the Ukrainian economy is impossible without the reconstruction and modernization of the logistics infrastructure. And this is an axiom.

In wartime conditions, the activity of transport and warehouse complexes, which include: logistics and fulfillment is a guarantor of the stability of the development of the entire country. Maintaining competitiveness and strength of the advantages of enterprises in this field of activity must be accompanied by the opportunity and desire to carry out all value creation processes that continuously circulate in their supply chains - from the supply of raw materials and goods to the end user's service.

The success of these tasks largely depends on the correct configuration of the logistics system of the warehouse enterprise itself, as well as on the synchronization of its work with other and no less important areas - logistics, transport and customer service. This largely explains the relevance of the study of the potential of using the network intralogistics system in the activity of transport and warehouse complexes, as one of the progressive scientific and applied directions of flow process management.

Analysis of recent researches and publications. Intralogistics is becoming the subject of researches and projects as a form of optimization, automation, integration and management of material and information flows circulating within business units. In particular, the analysis of the latest researches and publications makes it possible to distinguish at least two dominant groups of scientific and applied research of the use of intralogistics.

The first group focuses on prioritizing of the role of innovative, high-tech solutions in logistics, which are the fundamental basis of the fourth industrial revolution. Here, first of all, we are talking about the transformation of production units into smart environments where the entire process can be controlled using a single information system [1–3]. The research of this

group proves the value of intralogistics in the aspect of optimization and end-to-end management of the logistics flow of information within the logistics system of a transport and warehouse enterprise, distribution center or warehouse, as well as the management of physical materials based on modern information technologies, which was called " fulfillment ", due to which it is possible to reduce unnecessary expenses, the amount of inventory is minimized, and the safety of employees is improved. However, the implementation of intralogistics and fulfillment systems can range from basic automation, such as conveyors and packaging machines, to software-driven systems that manage manual and automated processes, providing real-time analysis and communication with other parties.

It should also be noted that in this context intralogistics is mostly narrowed down to the performance of data collection and analysis functions, which enables businesses to increase the efficiency of logistics processes, primarily at the level of warehouse and organization of transport processes.

The second group of researchers focuses on prioritizing the achievement of a high degree of cross-functional synergy of logistics inside the logistics system and outside it, which is conceptually based on fulfillment, management and its modernized version of the "concept of network intralogistics" [6-9].

At the same time, the general trend of world business against the traditional levers of influence on the consumer (prices, quality, elasticity, innovation, speed) is increasing the value of environmental performance and safety of goods, which is definitely of critical importance for basic necessities, especially in the conditions of global challenges caused by the Russian war in Ukraine.

The aim of the article. Therefore, it should be stated that the issue of the application of network intralogistics in the activity of transport and warehouse complexes requires a deep comprehensive study of the peculiarities of their activity from the point of view of identifying key factors on which the formation of competitive advantages of domestic warehouses in unstable military and economic conditions depends.

Network intralogistics combined with fulfillment is a system concept in which many processes and mechanisms interact with each other. Like any other management concept, intralogistics requires a systemic approach, in which the technological component must be balanced, integrated with the "intangible", the sphere of relations, in which strategic transport and logistics approaches and their integration with other functional spheres are of key importance: logistics and finance.

Results. The conducted studies in the field of logistics features of supply chains of goods at transport and warehouse complexes indicate the traditional characteristic features of the market in which these goods are sold:

- 1) all-season;
- 2) dynamism;
- 3) high competition;
- 4) constant struggle for leadership;
- 5) reducing the life cycle of goods,
- 6) emergence of new rules and requirements.

In particular, the successful operation of transport and warehouse complexes depends not only on compliance with corporate rules, tax and customs legislation, but also especially on consumer rights protection legislation. Extremely important aspects of doing business in this market are quality control and compliance with consumer rights, which have a significant impact on the financial performance of entrepreneurs.

In order to maintain their positions in this market, companies constantly transform their brand portfolio, expand their assortment, and introduce new products to the market.

Promotion and sales strategy, product availability and pricing, and a wide range of products are critical for players in this market. There is an opinion that the logistics solutions developed for the category of goods storage in warehouses are the most revolutionary.

Price consulting firm Waterhouse Coopers, companies in the consumer goods retail and logistics sector typically manage their planning, warehousing, supply and distribution functions at a regional level while support and strategic procurement functions are managed at a global level. They outsource about 7% of procurement planning and order processing, 30% of manufacturing operations, and 10–55% of direct supply work.

The Ukrainian sector of transport and warehouse complexes, according to research by experts the main trend here (in the last few years) before the war is the shift of consumer needs to cheaper goods of everyday demand, which are produced in Ukraine [1]. This is a consequence of a decrease in the purchasing power of the population. Among the trends, you can also observe: the slowdown in the growth rate of the industry; intense struggle for market share among manufacturers; change in retail formats (increasing the share of network retail); acceleration of growth rates, introduction of novelties in case of shortening of the life cycle of goods.

At the same time, the analysis of the peculiarities of the sector of transport and warehouse complexes makes it possible to assert that despite the fact that this market is protected from sharp economic fluctuations in consumer demand, including those caused by war (Fig. 1). At the same time, any drastic changes have a significant impact on the organization of logistics in this field and the challenges that all participants in the supply chain of the final product must go through.

Analyzing the segments of the sector of transport and warehouse complexes that show the highest consumer interest, it should be stated that the growth mainly occurs in those brands that are particularly well positioned in the global Internet network (due to their high presence in e-commerce).

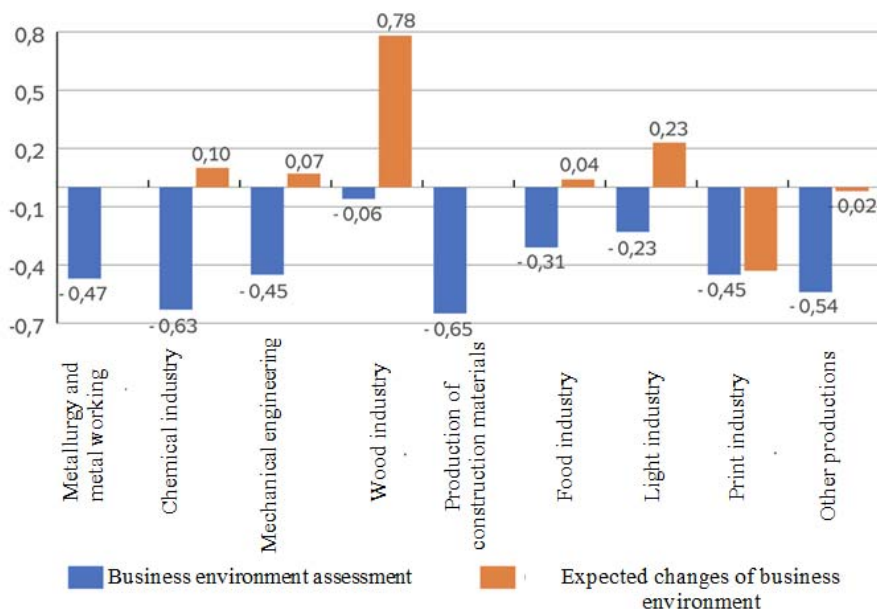


Figure 1 - Reaction of various branches of industry to military operations in Ukraine

Source: monthly survey of enterprises "Ukrainian business during the war". Institute of Economic Research and Policy Consulting, 2022

For many people in countries with curfew, online ordering has become the only alternative after the closure of many retail establishments [7]. Consumers are also concerned about their health, which means that brands related to household and personal hygiene are

sold in larger volumes.

The Nielsen company in Ukraine has recently held an event dedicated to electronic commerce (eCommerce), in which it presented a service for monitoring online sales in the field of everyday goods and determined that by the end of 2020, online sales in Ukraine occupied about 1% of the market. According to other sources, the statistics of Internet sales of goods before the quarantine and the war amounted to 3% [8]. In the conditions of quarantine and as of now, the model of purchasing goods from transport and warehouse complexes in the online format has taken a prominent place, surpassing all possible forecasts. Therefore, online stores, marketplaces, B2B portals, mobile applications are not just additional solutions for strategic business planning, but real opportunities for its growth and development, which should not be neglected.

According to the recommendations of logistics experts, it can also be concluded that Covid-19 and the war have led to serious cross-industry challenges, pointing to the importance of effective inventory management in the supply chain. A major influence is the change in consumer behavior which has shifted attention from traditional goods to pharmaceutical products and health care products. Logistics operators must be ready to increase the volume of supplies from manufacturers, both directly through retail networks, transport and warehouse complexes and electronic trade provide goods for sale [9].

Therefore, on the one hand, the mentioned challenges determine the inevitability of the use of modern Industry 4.0 digital technologies in intralogistics - the Internet of Things, robotization, analytics, big data, etc., which are aimed at increasing the productivity of logistics processes, increasing the level of their coherence, visualization, predictability both internally and outside the enterprise and on the other hand - the understanding that, based on the systemic approach of fulfillment, logistics achieves its goal only in close interaction and coordination with the needs and reactions of end users. The absence of systemic thinking and understanding of the symbiosis of logistics and fulfillment, those advantages that arise due to specialization in the service sector can be leveled, "scattered" in other areas, in particular in sales. As the scientists note, "it is possible to achieve a very high level of cost control in the field of production and to practically minimize the time spent, the volume of stocks due to a high level of specialization and the use of modern logistics tools, but it is extremely difficult to achieve the same results in the field of product sales. As a rule, it is in the field of distribution that the entire achieved positive effect of "total cost savings" in production is "dispersed".

For that reason we agree with the authors [1], logistics support based on the following three elements is more important today than ever: 1) customer satisfaction; 2) integrated logistics and fulfillment actions; 3) achievement of financial goals.

In general, logistics and fulfillment support is aimed at improvement of service and information dissemination. Therefore, some customers see the traditional "value" for logistics, such as a short service period, availability and timeliness of delivery. Customers, mainly within logistics support are increasing the demands on logistics itself by requesting operational tasks with added value, such as packaging, bar coding and information systems. In particular, one of the important intralogistics solutions at transport and warehouse complexes is targeting the practical implementation and efficiency of intra-logistics (internal logistics) and fulfillment. Fulfillment is a technique that business leaders use to deliver their messages to their own potential customers. For manufacturers, this is similar to conventional marketing, except that they are selling goods and services to their customers, as well as messages, programs, and policies to their employees.

At the same time, most enterprises still have a low level of logistics organization, when the responsibility for the performance of logistics functions is divided between several functional divisions - sales, marketing, supply, financial departments, etc. This leads to the impossibility of optimizing the entire logistics process and ensuring the implementation of

the general logistics strategy of the enterprise [9].

Therefore, the main task of network intralogistics and fulfillment, which definitely play an important role in modern transport and logistics solutions of enterprises, is the simultaneous achievement of minimizing inventory, speeding up operations, speed of response to changes in consumer behavior and reducing costs – those are financial and logistical goals due to combined and improved use of technology, labor and equipment on the one hand, and on the other – achieving mutual coordination of logistics solutions within the logistics system with other functional areas, primarily with the field of fulfillment, which will contribute to the joint overcoming of time, space, assortment, quantitative and other barriers to the path of movement of goods from sources of raw materials to end consumers, avoidance of processes and actions that do not have value, reduction of reaction time to changes in market demand.

There is no contradiction between the "material", the technological sphere of application of intralogistics, and the "intangible", the sphere of relations, in which strategic logistics approaches and their integration with other functional spheres: fulfillment and finance are important. There is an understanding of the importance of their combination in order to find the optimal management solution

In particular, implementing such view in an applied study of the features of the application of network intralogistics systems in transport and warehouse complexes, the results of the analysis of the changes observed in the market of transport and warehouse complexes in wartime conditions should be cited. The obtained results make it possible to highlight key challenges in the organization of logistics and fulfillment and actual tools for their mitigation (Fig. 1).

Figure 1 – Key challenges in the organization of logistics and fulfillment at transport and warehouse complexes

Branch	Key challenges	Field of activity	Counter instruments
Logistics	Increase of risks in inventory management	Supply, production, sales	Digital technologies
	Change of way counterparties interact – increase of importance of online contacts	Mostly between spheres of activity	Digital technologies
	Increase of risks in human resource management	Supply, production, sales	Remote technologies (WFH - Work From Home)
	Increase of requirements for the availability and speed of product delivery	Sales	Short supply chains of digital technologies
	Delays in transportation processes	Sales	
	Increase of online shopping	Sales	Internet trade
	Increase of requirements for quality/ environmental performance	Production	Green technologies
Fulfillment	Increase of online shopping (absence of physical shelves, closing of stores)	Sales	Internet technologies Social networks Digital marketing E-mail - commerce Customer Relationship Management
	Increase of demand	Production, sales	
	Demands to present the brand in the social network	Sales	
	Increase of importance of the D2C strategy (Direct To Consumer)	Sales	

Source: [1-3]

Therefore, the analysis of changes in the organization of logistics and fulfillment in the market of transport and warehouse complexes indicates a number of important from the point of view of the system of application of network intralogistics systems in the researched market, actual tools for countering or significantly mitigating the key challenges faced by transport and warehouse enterprises as a result of the spread quarantine measures and the connection with the brutal war in Ukraine.

This, in turn, makes it possible to form complex logistics support for the market of transport and warehouse complexes (Fig. 2), which is based on a system of selecting the most relevant network intralogistics and fulfillment tools for this market, which includes:

- digital technologies and the construction of short supply chains with the aim of obtaining positive effects in the field of inventory management, reducing risks in human resource management, in the field of transportation and increasing the ability to adapt to the growing influence of online communications and online purchases ;
- green technologies, their purpose is to ensure the safety and environmental performance of processes and final products for final consumers;
- internet marketing, social network marketing, digital and e-mail marketing with the aim of implementation of a customer-oriented strategy, and in particular the D2C strategy, which in the conditions of growing demand and the online format of purchases plays a decisive role, ensuring the critical loyalty and commitment of customers in the Internet.

Therefore, the complementarity of logistics and fulfillment tools within the network intralogistics application system constitutes a modern platform for building effective logistics systems and their supply chains, oriented on a high degree of customer satisfaction and loyalty.

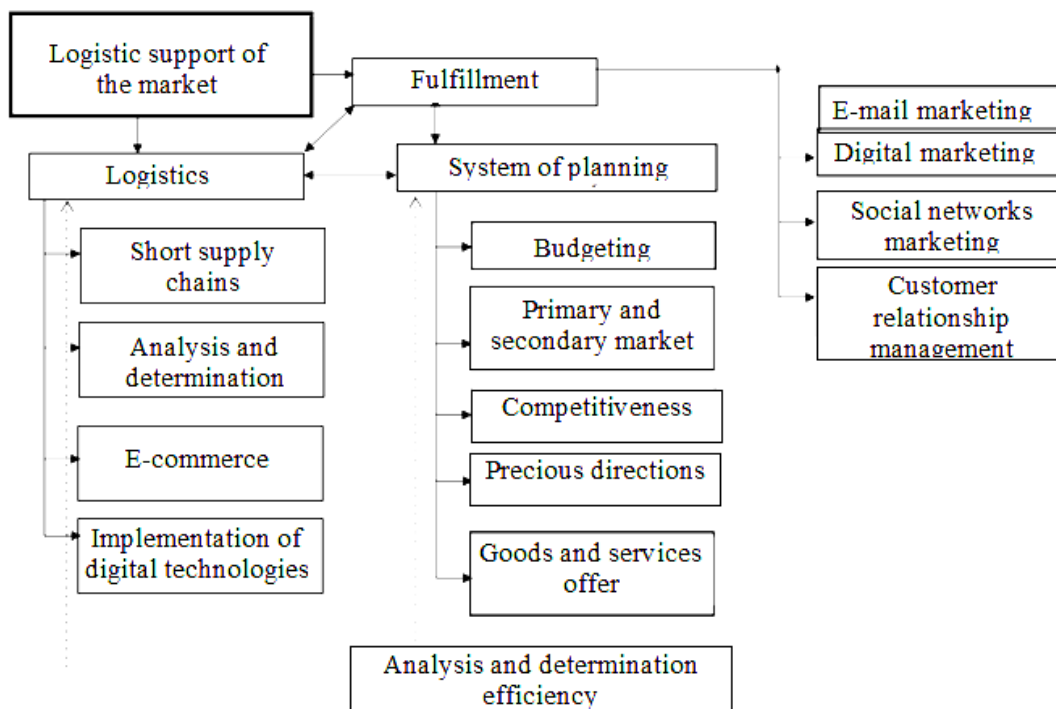


Figure 2 – Complex logistics support of transport and warehouse complexes
 Source: own research

Conclusions. The analysis of changes in the organization of logistics and fulfillment in the market of transport and warehouse complexes indicates a number of important from the point of view of the system of application of network intralogistics systems in the researched

market of actual tools of resistance or significantly mitigating the key challenges faced by enterprises as a result of the declaration of martial law in Ukraine. These include: digital technologies and the construction of short supply chains; green technologies; Internet marketing, social networks, digital and e-mail marketing, Customer Relationship Management.

Thus, the complementarity of logistics and fulfillment concepts forms a modern platform for building effective logistics systems and their supply chains, oriented to a high degree of customer satisfaction and loyalty.

The study of applied aspects of the implementation of the logistics approach to the management of logistics systems at transport and warehouse complexes requires further investigations.

Список літератури

1. Проблеми транспортно-логістичного забезпечення в аграрній галузі: монографія / О.С. Бережна та ін. Харків : Міськдрук, 2019. 180 с.
2. Gazda A., Osieczko K. The use of intralogistic systems in the enterprise: conference paper: CLC 2018: *Carpathian Logistics Congress, Prague*. URL: https://www.researchgate.net/publication/341736726_The_use_of_intralogistic_systems_in_the_enterprise (дата звернення: 20.04.2023).
3. Fernandes A., Baptista F.J.G., Silva R. D.S.G., Campilho G.F.L. Pinto. Intralogistics and industry 4.0: designing a novel shuttle with picking system: *9th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019)*, June 24–28, 2019, Limerick, Ireland. URL: https://www.researchgate.net/publication/339112304_Intralogistics_and_industry_40_designing_a_novel_shuttle_with_picking_system (дата звернення: 20.04.2023).
4. Moris J. What is Intralogistics? *Invata Intralogistics* : website, 2013. URL: <http://www.invata.com/what-is-intralogistics/> (дата звернення: 25.04.2023).
5. Tjahjono B., Esplugues C., Ares E., Pelaez G. What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*. 2017. № 13. P. 1175–1182.
6. Pukas A. Integracja koncepcji zarządzania relacjami z klientem oraz zarządzania łańcuchem dostaw i ich wykorzystanie w budowaniu przewagi rynkowej przedsiębiorstwa. *Marketing w 25-leciu gospodarki rynkowej w Polsce : monografia / A. Czubala, P. Hadrian, J.W. Wiktor*. Warszawa : Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2014. P. 378–385.
7. Hadrian P., Wiktor J.W. Warszawa : Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2014. P. 378–385.
8. Impact analysis: how is the consumer goods industry responding to coronavirus? URL: <https://www.reply.com/en/covid-19-fmcg-industry-impact-analysis> (дата звернення: 20.04.2023).
9. Logistics Manager Analysis: How Covid-19 is disrupting inventory management. URL: <https://www.logistik-express.com/logistics-manager-analysis-how-covid-19-is-disrupting-inventory-management/> (дата звернення: 20.04.2023).
10. Рожко Н. Я. Послуги ЗРЛ у межах відповідального логістичного міксу. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. Сер. Економічна. Юридична*. 2020. Вип. 25. С. 126–133.

References

1. Berezhna, O. S., Biliaieva, V. A. et al. (2019). *Problemy transportno-lohistychnoho zabezpechennia v ahrarnii haluzi [Problems of transport and logistics support in the agricultural sector]*. Kharkiv : Mis'kdruk [in Ukrainian].
2. Gazda, A. & Osieczko, K. (2018). The use of intralogistic systems in the enterprise: conference paper: *CLC 2018: Carpathian Logistics Congress, Prague*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/341736726_The_use_of_intralogistic_systems_in_the_enterprise [in English].
3. Fernandes, A., Baptista, F.J.G., Silva, R. D.S.G. & Campilho, G.F.L. (2019). Pinto. Intralogistics and industry 4.0: designing a novel shuttle with picking system: *9th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2019)*, June 24–28, 2019, Limerick, Ireland. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/339112304_Intralogistics_and_industry_40_designing_a_novel_shuttle_with_picking_system [in English].

4. Moris, J. (2013). What is Intralogistics? *Invata Intralogistics* : website. *invata.com*. Retrieved from <http://www.invata.com/what-is-intralogistics/> [in English].
5. Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E. & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*, 13, P. 1175–1182 [in English].
6. Pukas, A. (2014). Integracja koncepcji zarządzania relacjami z klientem oraz zarządzania łańcuchem dostaw i ich wykorzystanie w budowaniu przewagi rynkowej przedsiębiorstwa. *Marketing w 25-leciu gospodarki rynkowej w Polsce*. A. Czubała, P. Hadrian, J.W. Wiktor (Eds.). Warszawa : Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne [in Poland].
7. Hadrian, P. & Wiktor, J.W. (2014). *Warszawa : Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne* [in Poland].
8. Impact analysis: how is the consumer goods industry responding to coronavirus? Retrieved from <https://www.reply.com/en/covid-19-fmcg-industry-impact-analysis> [in English].
9. Logistics Manager Analysis: How Covid-19 is disrupting inventory management. Retrieved from <https://www.logistik-express.com/logistics-manager-analysis-how-covid-19-is-disrupting-inventory-management/> [in English].
10. Rozhko, N.Ya. (2020). Posluhy 3PL u mezhakh vidpovidalnoho lohistychnoho miksu. *Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. Ser. Ekonomichna. Yurydychna* , Issue 25, 126–133 [in Ukrainian].

Н.Я. Рожко, проф., д-р екон. наук, **О.П. Цьонь**, доц., канд. техн. наук, **У.М. Плекан**, канд. екон. наук, **А.Й. Матвійшин**, доц., канд. техн. наук, **Б.Р. Гевко**, канд. екон. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

Використання мережевої інтралогістики та фулфілменту для функціонування транспортно–складських комплексів

Одним із найперспективніших ринків, який є захищеним від циклічних змін, які відбуваються в економіці та демонструє приріст в умовах воєнного часу є діяльність транспортно–складських комплексів, до яких відносяться: логістика і фулфілмент. Збереження конкурентоздатності і підсилення переваг підприємств цієї сфери діяльності великою мірою зумовлюється здатністю оптимізувати всі процеси створення вартості, які безперервно циркулюють у їхніх ланцюгах поставок – від постачання сировини та товарів до сервісного обслуговування кінцевого споживача.

У статті досліджено особливості функціонування транспортно-складських комплексів із врахуванням змін та викликів, що виникли внаслідок поширення пандемії Covid -19 та в умовах воєнного стану. Виявлено ключові фактори, від яких залежить формування конкурентних переваг транспортно-складських комплексів у нестабільних економічних системах.

Обґрунтовано підстави існування контрарерсії щодо трактування концепції мережевої інтралогістики та фулфілменту за сучасних викликів та встановлено, що мережева інтралогістика є системною концепцією, в якій багато процесів і механізмів взаємодіють один з одним, а отже засновуючись на системному підході технологічна складова інтралогістики обов'язково має бути врівноважена, інтегрована із процесами фулфілменту, що включають комплекс операцій з моменту оформлення замовлення покупцем і до моменту отримання покупки.

Взаємодоповнення логістичних та фулфілментних інструментів в рамках системи застосування мережевої інтралогістики складає сучасну платформу побудови ефективних логістичних систем та їх ланцюгів поставок, зорієнтованих на високий ступінь задоволеності і лояльності клієнтів.

інтралогістика, фулфілмент, транспортно логістична інфраструктура, транспортно-логістичне забезпечення, діджитал-технології, інтернет-торгівля, обслуговування споживачів

Одержано (Received) 09.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023

ЗМІСТ

Комп'ютерна інженерія

- В.В. Смірнов, Н.В. Смірнова*
Мобільна mesh-мережа для управління роєм об'єктів..... 3
- Р.М. Минайленко, О.М. Дреєв, О.К. Коноплицька-Слободенюк, В.А. Резніченко*
Застосування мікроконтролера Raspberry Pi для управління
та моніторингу IoT систем 12

Прикладна механіка

- Т.В. Гайкова, Д.М. Ковальчук, Р.М. Гайков*
Аналіз науково-технічних інновацій в галузі машинобудування з виявленням
закономірності впливу технологічних параметрів..... 19
- М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А.Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко,
В.В. Ключкін*
Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого
захватного пристрою..... 27

Матеріалознавство

- В.М. Кропівний, М.В. Босий, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, Л.А. Молокост*
До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні
діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg»..... 34

Галузеве машинобудування

- О.І. Скібінський, А.О. Гнатюк, М.О. Годунко, Д.В. Богатирьов,
В.М. Селехова*
Синтез профілю зубчатих коліс малощумного шестеренного насоса
з низькою пульсацією 43
- А. Р. Апаракін*
Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних
гідравлічних машин 51

Агроінженерія

- В. В. Івлєв*
Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу 59
- Е. Б. Алієв, К. О. Лупко*
Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра..... 67
- В. С. Кошулько, Ю. О. Чурсінов, Н. А. Сова*
Результати дослідження процесу віброударної сепарації вівса на кормові цілі 75
- О. В. Козаченко, М. В. Бакум, А. Д. Михайлов, М. М. Кречот, О. С. Чала,
О.І. Завгородній*
Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного
на вібраційній насіннеочисній машині 83

О.В. Нестеренко, О.М. Васильковський, Р.В. Кісільов
Directions for Improvement of Feeding Devices of Pneumatic Separating Channels 90

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Sergey Osadchy, Larisa Vikhrova, Mariya Miroshnichenko, Valentin Soldatenko
Information technology for Synthesizing a Grain Mass Flow Multidimensional
Optimal Stabilization System with Perturbation Feedback 98

О.В. Щербак, А.В. Сумінов, С.Л. Хачатурян
Дослідження динамічних навантажень рами фронтального навантажувача
з використанням комп'ютерних 3D моделей у середовищі Siemens NX 104

Н.Ю. Гарасьова, А.І. Котиш, В.П. Солдатенко, В.В. Зінзура
Моделювання перехідних процесів в синхронному генераторі при
витковому замиканні обмотки статора 113

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

І.В. Савеленко, К.Г. Петрова, А.І. Котиш, О.І. Сіріков
Оптимізація параметрів мікроклімату в навчальних закладах з системами
локальної рекуперації повітря 123

Автомобільний транспорт

Т.В. Гайкова, О.А. Мурашко
Сприяння впровадженню електромобілів як науково-технічна інновація
в галузі автомобільного транспорту 130

А.В. Йовченко, І.А. Шльончак
Розробка алгоритма моніторингу стану водія за допомогою Android-
застосунку з метою підвищення рівня активної безпеки 139

І.О. Хітров
Аналіз конструкції кузова вантажного транспортного засобу 146

Ю.В. Дзядикевич, Ю.М. Петришин, М.Р. Башуцький, М.В. Буряк
Дослідження захисту деталей автомобілів від високотемпературного
окислення 153

В.Б. Захарчук, В.В. Кудінов, І.В. Кудінов, В.В. Бірючинський
Вплив експлуатаційних факторів на залишковий ресурс металоконструкцій
колісних транспортних засобів 159

В.В. Аулін, О.Л. Ляшук, А.В. Гриньків, С.В. Лисенко, В.З. Гудь, В.О. Тесля
Теоретико-методичні засади підвищення ефективності використання
парку машин в регіональних транспортних системах та підприємствах
на основі лізингових відносин 165

Ів.Б. Гевко, Ю.І. Пиндус, М.Г. Левкович, В.О. Тесля, А.Б. Гупка, М.Д. Сіправська
Дослідження напружено-деформованого стану дна кузова напівпричіпа
вантажного автомобіля в залежності від розміщення перемичок 180

Будівництво та цивільна інженерія

І.О. Скриннік, М.О. Федотова, В.В. Дарієнко, С.О. Джирма
 Досвід та тенденції розвитку монолітного будівництва при зведенні будівель та споруд..... 190

І.О. Скриннік, М.О. Федотова, В.В. Дарієнко, О.А. Кислун, Є.О. Томаченко
 Досвід використання сучасної опалубки при зведенні монолітних будинків в місті Кропивницькому 196

О.В. Дроботя
 Експериментальні випробування попередньо напружених несучих елементів огорожувальних конструкцій з холодноформованих сталевих профілів на косий згин..... 204

Транспортні технології (за видами)

В. Г. Загорянський
 Ергономічне забезпечення вимог до комфортності поїздки в міському автобусі великої місткості..... 213

А. Г. Кравцов, Т. Ф. Ларіна, О. М. Горяїнов, А.С. Козенок, Т.Е. Городецька, І.А. Бабич
 Обґрунтування критерію стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі 222

І.А. Шльончак, А.П. Солтус, М.П. Рудь
 Аналіз можливості застосування технології blockchain у сфері управління ланцюгами постачань..... 231

І.О. Кузєв
 Гібридні конструкції балок на транспорті із застосуванням металу 237

П.В. Попович, М.М. Маяк, Р.І. Розум, М.В. Буряк, К.М. Березька, Ю.Б. Коваль, С.А. Мишко
 Дослідження стану транспортної інфраструктури міста Тернополя 243

П.В. Попович, Р.І. Розум, І.С. Мурований, М.В. Буряк, К.М. Березька, Н.А. Петринюк, І.О. Лоїк
 Дослідження безпеки дорожнього руху у м. Тернополі..... 249

Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko
 The Use of Network Intralogistics and Fulfillment for the Functioning of Transport and Warehouse Complexes 257

CONTENT

Computer Engineering

Volodymyr Smirnov, Natalia Smirnova
A Mobile Mesh-Network for Control a Swarm of Objects..... 3

Roman Minailenko, Olexandp Dreev, Oksana Konoplitcka-Slobodenyk, Vitalij Reznichenko
Application of Raspberry Pi microcontroller for management and monitoring of IoT Systems 12

Applied Mechanics

Tetiana Haikova, Dmytro Kovalchuk, Roman Haikov
Analysis of Scientific and Technical Innovations in the Field of Mechanical Engineering with the Identification of Regularities in the Influence of Technological Parameters 19

Maksym Hodunko, Oleg Kyslun, Vitalii Mazhara, Volodymyr Shcherbyna, Roman Kravchenko, Vladyslav Klyushkin
Development of the Method of Force Calculation of a Vertically Oriented Gripping Device 27

Materials Science

Volodymyr Kropivnyi, Mykola Bosyi, Olexandr Kuzyk, Alena Kropivna, Ludmyla Molokost
On the Question of Structural Formation of High-Compression Cast Iron Using State Diagrams System "Fe-Si", "Mg-Si" and "Fe-Si-Mg" 34

Industrial Engineering

Oleksandr Skibinskyi, Andriy Gnatuk, Maksym Hodunko, Dmytro Bohatyrov, Valentyna Seliekhova
Synthesis of the Profile of Low-Noise Gear Pump Gears with Low Pulsation 43

Anton Aparakin
Modular-Parametric Principle of Design Development of Gear Hydraulic Machines 51

Agroengineering

Vitalii Ivliev
Numerical Modeling of Elastic Hysteresis of Loose Material 59

Elchyn Aliiev, Kristina Lupko
Results of Experimental Studies of the Selection and Seed Trier 67

Vitaliy Koshul'ko, Yuriy Chursinov, Nataliya Sova
Results of the Study of the Process of Vibro-Impact Separation of Oats for Fodder Purposes 75

Oleksiy Kozachenko, Mykola Bakum, Anatoly Mykhailov, Mykola Krakot, Olga Chala
Improving the Sowing Properties of Safflower Dye Seeds Using a Vibrating Seed Cleaning Machine 83

Oleksandr Nesterenko, Oleksii Vasylykovskiy, Ruslan Kisilov
Areas of Improvement of Feeding Devices for Pneumatic Separation Channels 90

Automation and Computer-Integrated Technologies

Sergey Osadchy, Larisa Vikhrova, Mariya Miroschnichenko, Valentin Soldatenko
Information technology for Synthesizing a Grain Mass Flow Multidimensional Optimal Stabilization System with Perturbation Feedback 98

Oleh Sherbak, Andrey Suminov, Serhiy Khachatryan
Study of Dynamic Loads of the Front Loader Frame Using 3D Computer Models in the Siemens NX Environment..... 104

Nataliia Harasova, Andrii Kotysh, Valentyn Soldatenko, Vasyl Zinzura
Simulation of Transient Processes of a Synchronous Generator in the Case of a Turn Short Circuit of the Stator Winding..... 113

Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics

Ivan Savelenko, Kateryna Petrova, Andrii Kotysh, Oleksandr Sirikov
Optimization of Microclimate Parameters in Educational Institutions with air Local Recovery Systems 123

Road Transport

Tetiana Haikova, Oleksii Murashko
Promoting the Introduction of Electric Vehicles as a Scientific and Technical Innovation in the Field of Road Transport 130

Alla Yovchenko, Ihor Shlionchak
Development of an Algorithm for Monitoring the Driver's Condition Using an Android Application in Order to Increase the Level of Active Safety..... 139

Ihor Khitrov
Analysis of the Truck Body 146

Yuriy Dzyadykevich, Yury Petryshyn, Mihayno Bashutskiy, Mykola Buryak
Research on Protection of Car Parts from High-temperature Oxidation 153

Vasyl Zakharchuk, Valery Kudinov, Ihor Kudinov, Vitaly Biryuchinsky
Influence of Operational Factors on the Remaining Resource of Metal Structures of Wheeled Vehicles 159

Viktor Aulin, Oleg Liashuk, Andrey Hrinkiv, Serhii Lysenko, Viktor Hud, Volodymyr Teslia
Theoretical and Methodological Principles of Increasing the Efficiency of the

Use of a Fleet of Cars in Regional Transport Systems and Enterprises Based on Leasing Relations 165

Ivan Hevko, Yuriy Pyndus, Mykhailo Levkovich, Volodymyr Teslia, Andriy Gupka, Maria Sipravska

Study of the Stress-Deformation State of the Bottom of the Semi-Trailer Truck Body Depending on the Placement of the Jumpers..... 180

Construction and Civil Engineering

Ivan Skrynnik, Marianna Fedotova, Victor Darienko, Stanislav Jirma

Experience and Development Trends of Monolithic Construction in the Construction of Buildings and Structures 190

Ivan Skrynnik, Marianna Fedotova, Victor Darienko, Oleg Kislun

Experience of Using Modern Formwork in the Construction of Monolithic Buildings in the City of Kropyvnytskyi 196

Olexander Drobotia

Experimental Tests of Prestressed Load-Bearing Elements of Fencing Structures Made of Cold-Formed Steel Profiles for Oblique Bending 204

Transport Technologies (by Types)

Volodymyr Zahorianskyi

Ergonomic Provision of Requirements for the Comfort of a Trip in a Large-capacity City Bus 213

Andrii Kravtsov, Tetiana Larina, Oleksiy Goryayinov, Anna Kozenok, Tetiana Gorodetska, Inna Babych

Justification of the Criterion of Stability of the Traffic Flow at the Sections of the Road Network 222

Ihor Shlionchak, Anatoliy Soltus, Maksym Rud

Analysis of the Possibility of Applying Blockchain Technology in the Field of Supply Chain Management..... 231

Ihor Kuziev

The Hybrid Structures of Beams on Transport Using Metal 237

Pavlo Popovych, Mykola Maiak, Ruslan Rozum, Mykola Buryak, Kateryna Berezka, Yurii Koval, Serhii Myshko

Study of the State of Transport Infrastructure of the City of Ternopol..... 243

Pavlo Popovych, Ruslan Rozum, Ihor Murovanyi, Mykola Buryak, Kateryna Berezka, Nataliya Petrynyuk, Ihor Loik

Road Traffic Safety Research in Ternopol..... 249

Natalia Rozhko, Oleg Tson, Uliana Plekan, Anatolii Matviishyn, Bogdan Gevko

The Use of Network Intralogistics and Fulfillment for the Functioning of Transport and Warehouse Complexes..... 257

Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії. Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

Анотація українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

Анотація англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

Структура анотацій:

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

Структура основного тексту статті:

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

Схема організації матеріалу статті:

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. *
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

Адреса для надсилання: stat_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

ДОВІДКА ПРО АВТОРА
українською та англійською мовами

	Українською	Англійською
Прізвище, ім'я, по-батькові:		
Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:		
Посада (повна назва, без аббревіатур):		
Наукова ступінь:		
Вчене звання:		
Назва статті:		
*Спеціальність:		
Адреса для надсилання збірнику:		
Контактні телефони (бажано мобільний):		
E-mail:		
ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)		

* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

В и п у с к 7(38)
Частина II

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 29.05.2023р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 34,25
Тираж 300 прим. Зам. № 0792